



TITLE:

コンクリート構造物に用いられる
表面被覆工法の耐久性評価手法に
関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

山田, 卓司

CITATION:

山田, 卓司. コンクリート構造物に用いられる表面被覆工法の耐久性評価手法に関する研究. 京都大学, 2014, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2014-03-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18243>

RIGHT:

コンクリート構造物に用いられる表面被覆工法の
耐久性評価手法に関する研究

山 田 卓 司

コンクリート構造物に用いられる表面被覆工法の 耐久性評価手法に関する研究

目 次

第1章 緒論

1.1 本論文の背景	1
1.2 本論文の目的	2
1.3 本論文の構成	3
参考文献	4

第2章 既往の研究

2.1 表面被覆工法を用いたコンクリート構造物の補修と性能評価基準の変遷	5
2.1.1 コンクリート構造物への表面被覆工法適用に対する取り組み	5
2.1.2 コンクリート構造物に適用される表面被覆工法の性能評価基準の変遷	8
2.2 実構造物に施工された表面被覆工法の追跡調査	19
2.3 コンクリート構造物に適用される表面被覆工法に関する研究および調査報告	20
2.4 まとめ	25
参考文献	27

第3章 表面被覆工法の性能把握に関する試験方法の検討

3.1 はじめに	29
3.2 表面保護工に求められる要求性能	30
3.3 表面被覆工法	34
3.3.1 有機系被覆工法	36
3.3.2 無機系被覆工法	39
3.4 表面被覆工法の性能評価に関する試験方法の現状	43
3.4.1 耐候性	43
3.4.2 遮断性	46
3.4.3 付着性	49
3.4.4 ひび割れ追従性	49
3.4.5 表面被覆工法の性能評価に関する試験方法のまとめ	50
3.5 付着強度試験の現状とはく離試験の検討	52
3.6 カッターナイフはく離試験の提案	54
3.7 はく離試験条件の検討	55
3.8 見かけのはく離抵抗性試験の提案	57
3.9 まとめ	59
参考文献	60

第4章 屋外暴露環境下での表面被覆工法の耐久性評価に関する研究

4.1 はじめに	61
4.2 試験概要	61
4.3 試験実施工法	61
4.4 屋外暴露耐候性試験	70
4.5 試験項目	71
4.6 試験結果および考察	71
4.6.1 付着強度試験	72
4.6.2 カッターナイフはく離試験	74
4.6.3 見かけのはく離抵抗性試験	78
4.6.4 試験方法間の相関性	83
4.6.5 付着性評価方法の相互関係	86
4.7 まとめ	87
参考文献	88

第5章 屋外暴露耐候性試験と促進劣化試験の相関に関する研究

5.1 はじめに	89
5.2 試験概要	89
5.3 促進劣化試験	90
5.3.1 促進耐候性試験	90
5.3.2 耐久性サイクル試験	92
5.3.3 付着性評価試験	93
5.3.4 試験結果および考察	93
5.4 屋外暴露耐候性試験結果との関係	107
5.4.1 付着強度試験	107
5.4.2 見かけのはく離抵抗性試験	110
5.4.3 屋外暴露耐候性試験結果との相関性	113
5.5 まとめ	115
参考文献	116

第6章 表面被覆工法のひび割れ追従性に関する研究

6.1 はじめに	117
6.2 試験概要	118
6.3 室内試験によるひび割れ追従性	118
6.3.1 試験実施工法	118
6.3.2 試験方法	118
6.3.3 試験結果および考察	119
6.4 屋外暴露耐候性試験後のひび割れ追従性	120
6.4.1 試験実施工法	121

6.4.2 暴露試験	121
6.4.3 試験方法	121
6.4.4 試験結果および考察	122
6.5 ひび割れ追従性の耐久性評価	125
6.5.1 試験実施工法	125
6.5.2 促進劣化試験	125
6.5.3 試験結果および考察	126
6.5.4 促進劣化試験と屋外暴露耐候性試験結果との関係	132
6.6 まとめ	143
参考文献	144

第7章 結論

7.1 本研究で得られた結論	145
7.2 表面被覆工法に関するシナリオデザイン	148
7.2.1 表面被覆工法に関する耐久性評価のあり方	148
7.2.2 シナリオデザイン	152
7.3 今後の課題	155
参考文献	156

謝辞	157
----	-----

第1章 緒論

1.1 本論文の背景

コンクリート構造物は、適切に設計・施工を行えば、本来高い耐久性を有するきわめて優れた構造形式であり、わが国の社会基盤整備における大きな役割を担ってきた。これからも大きな貢献を期待される重要な役割を担う材料であり、構造物であることに変わりはない。しかし、頑健なコンクリート構造物であっても、厳しい環境条件に曝される場合や、適切な材料選定と入念な施工および管理が実施されなかった場合には、予想以上に早期に劣化する事例もあり、コンクリート構造物の維持管理がますます重要となってきた。

高度経済成長に支えられた20世紀後半は、いわゆる建設ラッシュの時代であり、道路・鉄道・オフィスビル群等の大型構造物が、急速な勢いで建設されてきた。その一方、21世紀を迎えようとする1999年頃より、トンネル覆工や高架橋からのコンクリート片はく落等、多くの劣化事例が発生している。2012年12月には、山梨県大月市笹子町の中央自動車道上り線笹子トンネルで天井板のコンクリート板がおよそ130mにわたり落下し、走行中の車複数台が巻き込まれて死傷者が出るという大事故も発生している。これからは新たな建設だけではなく、高度成長期に建設された構造物を如何に永く美しく安全に維持管理していくかという、メンテナンス中心の「維持管理」時代に突入する。また、新設構造物に対しても「予防保全」への配慮を避けては先に進めない時代へとなってきた。

上記を踏まえ、コンクリート構造物が塩害や中性化などにより劣化が進行していく中、コンクリート構造物の耐久性向上は必要不可欠であり、設計・材料・施工など様々な側面から対策手法が提案されている。その中でコンクリート構造物の耐久性向上・補修対策手法として表面保護工法¹⁾がある。この表面保護工法は、表面処理工法と断面修復工法の2つに大別される(図 1.1.1)。さらに、表面処理工法は適用する材料から、表面被覆工法と表面含浸工法の2工法に分けられる。この表面被覆工法は、コンクリート構造物への塗装、すなわち表面を樹脂等で被覆するもので、その検討が行われ始めてから四半世紀以上の時間が経過している。表面被覆工法は、高分子材料やシート工法にみられる繊維シートと接着剤が一体となっ

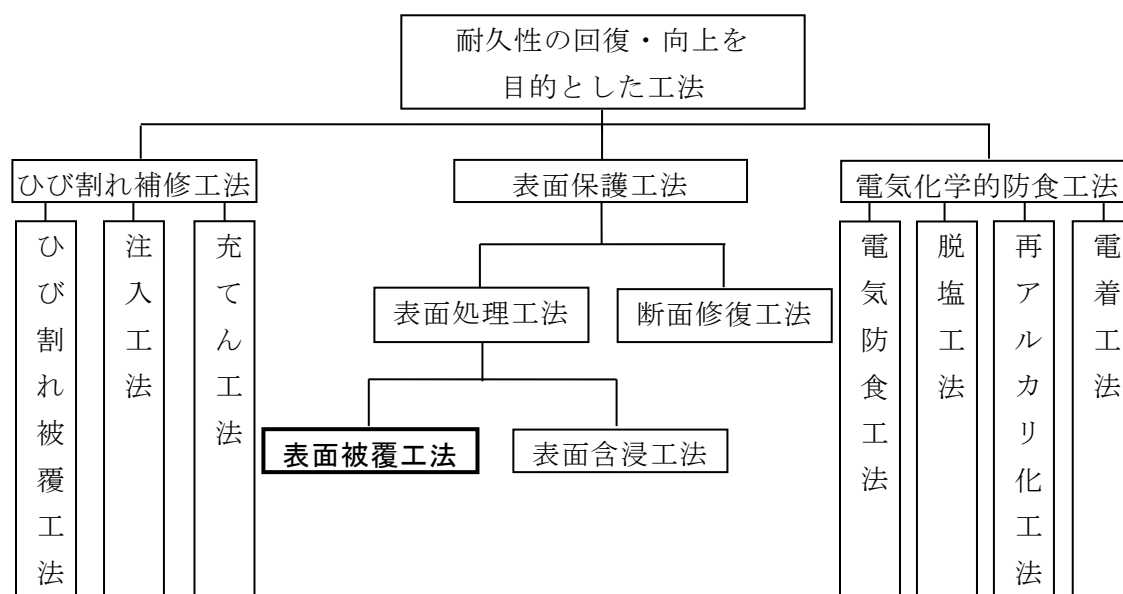


図 1.1.1 表面保護工の分類

たFRPのような材料から成る表面被覆材を用いて、コンクリート構造物の劣化を引き起こす因子である塩化物イオン、二酸化炭素、酸素等の侵入を防止、抑制するために適用されている。表面被覆工法は、対象物に塗料等を直接塗布することで、外部からの影響を受けにくくすることができる工法であり、コンクリート構造物の性能低下を抑えるのに有効な手段といえる。したがって、その表面被覆工法に用いられる表面被覆材の耐久性は、非常に重要である。また、表面被覆材の一つである塗料に目を向けると、その歴史は古く、「塗る」ということから考えるなら、古代遺跡などに多く見られ、洞窟に描かれた獣等の壁画、ピラミッドや古墳内部の壁画等²⁾がある。また、わが国の塗料を語るには「漆」を避けては通れない²⁾。抗菌防虫作用をもつ漆は、社寺等の歴史的建造物にも用いられており、美観および保護である「守る」ことには大いに役立ってきている。すなわち表面被覆工法に適用されている表面被覆材は、「守る」ことにおいて重要なアイテムと考えられる³⁾。

コンクリート塗装に関する国内の最初の基準は昭和59年2月に社団法人 日本道路協会が発刊した「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」である⁴⁾。更に旧建設省を中心に昭和60～62年度の3年間で総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」に対する取り組みが行われるとともに、塩害、アルカリ骨材反応、耐久性に関する各種の通達が出された。同時に、施工マニュアル、補修・補強指針(案)が取りまとめられている⁵⁾。また、旧日本道路公団におけるコンクリート被覆工法に関する研究は、西湘バイパスの塩害対策⁶⁾を機に始まった。その調査結果をもとに旧日本道路公団 維持管理要領(橋梁編)、第3編 コンクリート構造物[Ⅱ]高欄・地覆、塗装材料規格が昭和63年5月に発刊されている⁷⁾。道路橋、特に壁高欄における表面被覆工法は昭和58年頃から検討され始めていたが、昭和60年代に入り、耐久性向上を図るため表面被覆工法によるコンクリート構造物の補修が行われた。使用される塗料(塗装仕様)は、防食材としての要求性能に合致した材料が使用されている。ただ、その表面被覆工法に用いられる表面被覆材の性能評価を行うための基準および試験方法は完璧ではなく、設定された要求性能には、耐久性、ひび割れ追従性が構造物の条件によっては十分でないものもあり、今なお実構造物での試験塗装や暴露供試体の追跡調査を通して情報を集積し、試験方法の確立を図っているのが実態である。これからも様々な事例を調査することで、より精度よく表面被覆工法の耐久性を把握することが重要と考えられる。また、適用される表面被覆材も有機系だけでなく、無機系材料も数多く採用されており、2005年に出版された土木学会「表面保護工法設計施工指針(案)」¹⁾では、有機系14工法および無機系6工法の施工事例が紹介されている。

1.2 本論文の目的

コンクリート構造物に対し、表面を覆うことで劣化因子の侵入を防ぎ、対象物の寿命を延ばすことは社会的資産を守る上でも重要なことである。現在、表面被覆工法に用いられる表面被覆材そのものの初期性能を評価する試験方法は、土木学会「表面保護工法設計施工指針(案)」¹⁾をはじめ、東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社(以下「NEXCO」という.)ではコンクリート被覆材料の性能評価基準⁸⁾、西日本旅客鉄道では表面処理工基本規格値⁹⁾等、各種団体規格でも定められ、多方面で活用されている。しかし、その長期にわたる耐久性を評価するには、実構造物における様々な事象を検討し、

より良い評価手法を見出すことが必要とされている。その性能を評価する試験方法は、多方面でその性能を定量的に把握できるように設定されている。しかし、試験室内での試験では性能を満足する一方、現場の構造物の環境によっては異なる結果を得る場合があるのも事実である。特に、表面被覆工法の耐久性評価は、屋外暴露による耐候性試験で評価することが望ましい。中には、長期にわたる屋外暴露耐候性試験による物性の劣化程度を二次物性試験として定期的に調査し、表面被覆工法の有効性を示している報告も数多くある^{3), 6), 7), 10), 11), 12), 13), 14), 15)}。しかし、製品の開発を急ぐため、評価結果を迅速に得るために劣化を加速させることを意図した促進試験が多用されているのも現状である。表面被覆工法に用いられる樹脂や塗装系によりその劣化機構が異なるため、促進試験と屋外暴露耐候性試験の相関関係を把握することは非常に困難である。試験方法の改良を重ね、表面被覆工法の耐久性評価を試みているが、長期間を要する屋外暴露耐候性試験に頼らなければならないのが実状である。

本論文では、コンクリート構造物の耐久性に重要な関わりを持つ劣化因子の透過制御に着目する。この透過制御は、躯体との密着性および塗膜の割れ等の欠陥の有無によって大きく左右される。そこで、躯体との付着性、ひび割れ追従性および屋外暴露耐候性試験とより良好な関係を見いだせる促進試験方法に着目し、コンクリート構造物を末永く美しく安全に供用し続けていくためのシナリオを構築するため、より精度の高い評価手法の提案を行う。

1.3 本論文の構成

本論文は、全7章からなる。

第1章「緒論」では、研究の目的並びに論文の構成を示す。

第2章「既往の研究」では、表面被覆工法の性能を把握するために検討された評価基準および実構造物に適用された表面被覆工法の追跡調査についての既往の研究を整理し、表面被覆工法の耐久性に関する試験方法について検討すべき事柄をまとめ提起する。

第3章「表面被覆工法の性能把握に関する試験方法の検討」では、表面被覆工法の特徴を示すとともに、適用される表面被覆材に要求される耐久性評価について、試験方法の現状とその問題点について述べる。また、**第2章**で提起した問題を解決するべく過去の事例を基に、既存の試験方法で評価しきれなかった現象を把握し、表面被覆材の性能として重要なものの一つである付着性に着目し、その耐久性評価を行うための試験方法の提案を行う。

第4章「屋外暴露環境下での表面被覆工法の耐久性評価に関する研究」では、現在、表面被覆工法として使用されている主な表面被覆材を対象に、表面被覆工法の性能を統一した条件下で包括的に評価する試験方法の提案を目的として実施している、表面被覆材の耐久性評価¹⁵⁾について、**第3章**で提案した試験方法を用いて付着性に着目した検討を行う。

第5章「屋外暴露耐候性試験と促進劣化試験の相関に関する研究」では、**第4章**での調査結果を踏まえ、表面被覆材の耐久性を把握するための促進劣化試験を実施し、付着性を評価項目として屋外暴露耐候性試験との関係を検討する。

第6章「表面被覆工法のひび割れ追従性に関する研究」では、試験室内での試験結果と実構造物での調査結果が異なる場合のあるひび割れ追従性に着目し、その耐久性について検討する。

第7章「結論」では、本研究で得られた結論を総括するとともに、各章で得られた評価結果および知見をもとに、表面被覆工法に関するシナリオデザインについて提言を行い、本研究のまとめとする。

[第1章 参考文献]

- 1) (社)土木学会：2005年制定 表面保護工法設計施工指針(案)，2005
- 2) 植木憲二：塗料のおはなし，日本規格協会，1986.2
- 3) 山田 卓司，渡辺 佳彦：コンクリート構造物への表面被覆工法の適用，橋梁と塗装，2010.8
- 4) 土木学会：コンクリートの表面被覆材及び表面改質に関する技術の現状，コンクリート技術シリーズ No.58，2004.2
- 5) 建設省：総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性の開発報告書，1989
- 6) 豊福 俊泰，吉岡 博幸，用害 比呂之：コンクリート補修材の品質特性 - コンクリート塗装材・断面修復材・鉄筋防錆材 - ，日本道路公団試験所報告，Vol.25，p.73-86，1988
- 7) 豊福 俊泰，吉岡 博幸，用害 比呂之，関根 信哉：コンクリート塗装材の品質試験，コンクリート工学，Vol.28，No.2，Feb.1990
- 8) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社，構造物施工管理要領，平成24年，7月
- 9) 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部施設部，コンクリート構造物補修の手引き[第五版]，平成20年，4月
- 10) 樺山好幸，吉田幸信，吉田敦，山田卓司，宮川豊章：塗装系防食材の追跡調査に基づく耐久性能評価と付着性能評価手法の提案，コンクリート工学論文集，Vol.14，No.3，pp.11-22，2003.3
- 11) 吉田 幸信，大西 邦晃，樺山 好幸，山田 卓司：コンクリート構造物の塗装系防食材の追跡調査に基づく評価，第2回 コンクリート構造物の補修補強アップグレードシンポジウム論文報告集第2巻，pp.353-360,2002.10
- 12) 安藤 幹也，藤原 俊明，山本 雅貴，山田 卓司：コンクリート構造物の塗装系防食材の追跡調査報告，第5回 コンクリート構造物の補修補強アップグレードシンポジウム論文報告集第5巻，pp.399-404,2005.10
- 13) 宮下 剛，元売 正美，椎名 貴快，荒木 昭俊，岸 利治：各種表面被覆材の長期内陸・海洋暴露による耐久性能，土木学会第67回年次学術講演会，pp.251-252，2012.9
- 14) 渡辺 佳彦，荒巻 智，松田 好史，山田 卓司，宮川 豊章：山陽新幹線 RC 高架橋に適用する表面被覆工法の評価方法について，材料，Vol.58，No.8，pp691-696，2009.8
- 15) 山田 卓司，佃 洋一，山本 貴士，国枝 稔，宮川 豊章：表面被覆工法の付着特性に着目した耐久性評価方法に関する研究，材料，Vol.61，No.10，pp.715-720，2012.10

第2章 既往の研究

2.1 表面被覆工法を用いたコンクリート構造物の補修と性能評価基準の変遷

2.1.1 コンクリート構造物への表面被覆工法適用に対する取り組み

本来、コンクリート構造物は丈夫なもので非常に耐久性があると考えられてきた。しかし、丈夫なコンクリート構造物も施工されてから年数を経ることで、徐々にではあるが必ず劣化の道をたどることになる。コンクリート構造物に劣化をもたらす原因は、材料・施工方法・設置環境等、様々なものが考えられる。

例えば、「塩害」は、コンクリート中に存在する塩化物イオンの作用により鋼材（鉄筋や PC 鋼材など）が腐食し、鉄筋の不動態被膜の破壊による腐食で生成された腐食生成物の体積膨張により構造物に変状が生じる。1970年代後半から問題となった北陸から東北にかけての日本海沿いの国道7号線の道路橋で発生した塩害は、外部からの飛来塩分による劣化事例であったり。また、骨材中の特定の鉱物とコンクリート中のアルカリ性細孔溶液との間で化学反応を起こし、コンクリート内部で局所的な容積膨張が生じることで、コンクリートにひび割れを生じさせ、強度低下あるいは弾性係数の低下という物性変化をおこす「アルカリ骨材反応」の存在も知られている。さらに、コンクリート内に大気中の二酸化炭素(CO₂)が侵入し、炭酸化反応を引き起こすことで本来アルカリ性である細孔溶液のpHを下げ、鉄筋の不動態被膜の破壊による腐食で生成された腐食生成物の体積膨張によって、コンクリートのひび割れやはく離が生じることで構造物の性能低下を引き起こす「中性化」がある。以上の3種類の劣化機構は、代表的な劣化機構と考えられている。しかし、劣化は、単独で起こるものとは限らず、山陽新幹線の高架橋等で問題となった、「中性化」と「塩害」という複合的な劣化の場合もあり得る²⁾。このような劣化対策の一つとして「塗装」がある。第1章で述べたように、上記のような劣化を引き起こす要因である塩化物イオン、二酸化炭素、酸素等の侵入を防止、抑制するために樹脂等を用いる「表面被覆工法」がこれにあたる。なお、本論文では、表面被覆工法、表面被覆材の定義は土木学会「2005年制定 表面保護工法設計施工指針(案)」に従って記載しているが、本章は、各機関・団体によっては固有の用語を使用している場合があり、そのまま使用した。

コンクリート塗装に関する国内の最初の本格的な基準は、1984年（昭和59年）2月に社団法人 日本道路協会が発刊した「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」である³⁾。この中にコンクリート塗装が取り上げられており、A種・B種・C種という3種類の塗装系が示されている。コンクリート部材の種類や使用条件を分類ごとに記したものを表 2.1.1.1に、また、各分類に対する塗装仕様の一例を表 2.1.1.2～表 2.1.1.4に示す。

表 2.1.1.1 塗装系の分類

分類	コンクリート部材の種類・使用条件
A種	プレストレストコンクリート部材に一般に用いる塗装系
B種	鉄筋コンクリート部材に主として用いる塗装系
C種	塗替えが難しい場合や、特に著しい腐食が予想される構造物等、特定部位に用いる塗装系（長期防錆型）

表 2.1.1.2 A種の塗装系

工程		使用材料	塗装条件			塗装 間隔
			目標膜厚 (μ m)	標準使用量 (kg/m ²)	塗装方法	
前 処 理	プライ マー	エポキシ樹脂プライマー	—	0.10	エアレススプレー (はけ・ローラー)	各工程 の間隔 は、1日 以上10 日以内 を標準 とする
	パテ	エポキシ樹脂パテ	—	0.30	へら	
中塗り		エポキシ樹脂塗料中塗り	60	0.32 (0.26)	エアレススプレー (はけ・ローラー)	
上塗り		ウレタン樹脂塗料上塗り	30	0.15 (0.12)	エアレススプレー (はけ)	

表 2.1.1.3 B種の塗装系

工程		使用材料	塗装条件			塗装 間隔
			目標膜厚 (μ m)	標準使用量 (kg/m ²)	塗装方法	
前 処 理	プライ マー	エポキシ樹脂またはポリ ウレタン樹脂プライマー	—	0.10	エアレススプレー (はけ・ローラー)	各工程 の間隔 は、1日 以上10 日以内 を標準 とする
	パテ	エポキシ樹脂パテ	—	0.30	へら	
中塗り		柔軟形エポキシ樹脂また は柔軟形ポリウレタン樹 脂塗料用中塗り	60	0.32 (0.26)	エアレススプレー (はけ・ローラー)	
上塗り		柔軟形ウレタン樹脂塗料 上塗り	30	0.15 (0.12)	エアレススプレー (はけ)	

表 2.1.1.4 C種の塗装系

工程		使用材料	塗装条件			塗装 間隔
			目標膜厚 (μ m)	標準使用量 (kg/m ²)	塗装方法	
前 処 理	プライ マー	エポキシ樹脂またはポリ ウレタン樹脂プライマー	—	0.10	エアレススプレー (はけ・ローラー)	各工程 の間隔 は、1日 以上10 日以内 を標準 とする
	パテ	エポキシ樹脂パテまたは ビニルエステル樹脂パテ	—	0.30	へら	
中塗り		厚膜形エポキシ樹脂また はビニルエステル樹脂塗 料中塗り	350	1.20	エアレススプレー (はけ・ローラー)	
上塗り		柔軟形ウレタン樹脂塗料 上塗り	30	0.15 (0.12)	エアレススプレー (はけ)	

なお、日本工業規格では、「建築用仕上塗材」としてJIS A 6909 建築用仕上塗材が1972年（昭和47年）に、また、JIS A 6916 建築用下地調整材が1983年（昭和58年）に制定されており、阪神高速道路公団では、コンクリート構造物表面保護工便覧（案）が1984年（昭和59年）に制定されている。

片脇⁴⁾は、この「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」は、1980年頃から始まった土木研究所の研究による」とし、鋼橋への重防食塗装の適用が検討されたのとほぼ同時期にコンクリートへの適用試験が始まったと記述している。また、「東京湾横断道路プロジェクトの基本調査として海上でのコンクリート暴露試験が開始され、この中にも塗装供試体が組み込まれた」とも記している。さらに、コンクリート構造物への表面被覆工法適用の始まりは1982年（昭和57年）の府屋大橋での塗装工事だが、試験工事という意味合いもあって公開されなかったことも記している。当時はコンクリート橋への塗装は海外でもほとんど例がなく、また、コンクリート構造物への表面被覆工法の適用に対して一部に反対もあり、総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術開発の一環として1980年台初頭から各地で試験工事を実施していた。したがって、1984年（昭和59年）の道路橋の塩害対策指針（案）・同解説 発行までは対策が公開されることはなかったようである。

道路橋の塩害対策指針（案）・同解説が1984年に発行された翌年、1985年（昭和60年）より3ヶ年という歳月をかけ、建設省総合技術開発プロジェクトが実施されている。これを基に1989年（平成元年）5月にまとめられたコンクリートの耐久性向上技術の開発では、塗装システムの品質規格を提案している。本規格は、厚膜柔軟形材料によるコンクリートへのひび割れ追従性付与と厚膜化による塩害、アルカリ骨材反応への対策が示されており、施工マニュアル、補修・補強指針（案）が取りまとめられている⁵⁾。

コンクリート構造物への表面被覆工法の適用については、1980年代には道路系の各公団も積極的に取り組んでいる。旧日本道路公団は、西湘バイパスの塩害対策を機にコンクリート被覆材に関する研究を始めている。旧日本道路公団の管理するコンクリート構造物の中で、部材厚が薄く鉄筋のかぶりの小さい壁高欄は、劣化作用に対して厳しい条件であり、コンクリートのひび割れ、はく離、鉄筋腐食などの損傷がみられ、補修が行われる事例が多くなっていたようである。このような事例に対してコンクリート表面に塗装を施し、劣化原因となる環境物質（水、酸素、二酸化炭素、塩分等）の侵入を抑制することで、構造物の劣化を防ぐ試みがなされた⁶⁾。当時「ライニング工法」と呼ばれたこの工法について、施工順序や各材料の機能と目的が示されている。一般的な施工順序を以下に示すとともに、各材料の機能と目的を表 2.1.1.5に示す。

- ① 素地調整工：コンクリート表面の汚れ、脆弱部分を取り除く作業。
- ② はつり工：コンクリートのはく離、ひび割れの発生部分を取り除く作業。
- ③ 防錆処理工：鉄筋の錆を除去し、鉄筋防錆材を塗布する作業。
- ④ 下地処理工：プライマーおよび不陸調整材を塗布する作業。
- ⑤ 断面修復工：欠損断面を断面修復材により、元の断面形状まで修復する作業。
- ⑥ 主 材 工：主材を塗布する作業。
- ⑦ 仕上げ材工：仕上げ材を塗布する作業。

西湘バイパスでの調査結果をもとにまとめられたコンクリート表面被覆材の品質規格(案)

が、日本道路公団 維持管理要領(橋梁編)，第3編コンクリート構造物[Ⅱ]高欄・地覆，塗装材料規格 として1988（昭和63年）年5月に旧日本道路公団試験研究所より発行されている⁷⁾。

表 2.1.1.5 各材料の機能と目的

材 料 名			機 能・目 的
コン ク リ ー ト 塗 装 材	下 地 処 理 材	プライマー	下地コンクリートと主材・断面修復材との付着性の向上を図る
		不陸調整材	下地コンクリートの表面の気泡をつぶし，塗装に適した平滑な表面を成形する
	主 材		水密性，気密性をもち，コンクリートおよびコンクリート中の鉄筋の劣化を防ぐ
	仕上げ材		主材の耐候性および美観の向上を図る
	断面修復材		コンクリートの欠損断面を修復する
鉄筋防錆材		鉄筋腐食を防止する	

また，北陸支社管内の親不知高架橋の塩害対策として表面被覆工法で用いる表面被覆材の品質改善や品質規格についての検討が進められた⁸⁾。旧試験研究所では，表面被覆工法の耐久性能確認のため，長期に亘る屋外暴露耐候性試験を，1997年（平成9年）3月より北陸，沖縄，東京の3か所にて実施し⁹⁾，その後，暴露10年後の追跡調査結果¹⁰⁾をもとに，2008年（平成20年）8月に**コンクリート塗装材の品質規格試験方法（JHS417）**として改訂されている¹¹⁾。改訂の主な内容は，耐久性試験として評価項目に「耐湿性試験後の塗膜の外観」が追加されたことである。高湿度環境に7日間曝したのちの塗膜外観評価を行うが，高湿度環境が想定される場合は10日間の耐湿性試験を実施することとしている。

補修および予防保全を目的としたコンクリートへの塗装を行う「表面被覆工法」は，2005年（平成17年）にコンクリート塗装を体系化する試みとして，土木学会内に設置された表面保護工法研究小委員会（委員長：山本 泰）にて，**表面保護工設計施工指針（案）**がまとめられ，多くの工法，材料および施工管理等が，系統的に分類され整理されている。本設計・施工指針（案）は，各工法別（例えば，有機系被覆工法，無機系被覆工法）の要求性能をまとめているだけでなく，**表面保護工法 工種別マニュアル編**，**表面含浸材の試験方法（案）**，付属資料としてコンクリート構造物の維持管理計画と表面保護工法の性能設計および工種別表面保護工に関する資料（有機系14工法および無機系6工法の施工事例）を掲載している。

以上のように，コンクリート構造物への表面被覆工法適用の歴史は，1982年（昭和57年）の府屋大橋に始まり，31年を経た今もコンクリート構造物を守るため，その工法，材料，施工管理等の見直しが積極的になされている。

2.1.2 コンクリート構造物に適用される表面被覆工法の性能評価基準の変遷

2.1.1項で述べたように，1984年（昭和59年）2月に社団法人 日本道路協会により「道路橋

の塩害対策指針（案）・同解説」が発行され、約30年が経過しようとしている今もなお、適用される目的や部位、また、さまざまな実構造物での追跡調査や屋外暴露耐候性試験での追跡調査結果をもとに、塗装に関する取り組みや、コンクリートに用いられる表面被覆工法に関する性能評価基準の制定および改訂がなされている。

2.1.2項では、塗装に関する主な取り組みと、これまでに制定・改訂されてきたコンクリート塗装に関する主な基準類を年代ごとにまとめる。

(1) 塗装に関する主な取り組みとコンクリート構造物への表面被覆工法適用に関する主な基準類の変遷

1982年（昭和57年）：府屋大橋 国内初の新設橋へのコンクリート塗装
（建設省北陸地方整備局）

1984年（昭和59年）：塩害を受けたコンクリート構造物の補修指針案（土木研究所）
道路橋の塩害対策指針（案）・同解説 発行（日本道路協会）
（表 2.1.2.1,）

1984年（昭和59年）：コンクリート構造物表面保護工便覧（案）（阪神高速道路公団）

1985年（昭和60年）：総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性の開発（建設省）
→ 1989年（平成元年）総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書発行

1988年（昭和63年）：維持管理要領(橋梁編)，第3編コンクリート構造物[Ⅱ]高欄・地覆，塗装材料規格維持管理要領に被覆材の品質規格を制定（日本道路公団）
→ 構造物施工管理要領 コンクリート表面被覆材の性能照査を2008年（平成20年）に一部改正（表 2.1.2.2）

1989年（平成元年）：コンクリート構造物の表面保護工便覧（案）・同解説 発行（阪神高速道路公団・日本材料学会），
→ 2007年（平成19年）改訂（表 2.1.2.3, 表 2.1.2.4）

1990年（平成 2年）：山陽新幹線RC高架橋での表面被覆工法の試験方法・品質規格制定
ライニング材料規格値を制定（西日本旅客鉄道），

1994年（平成 6年）：コンクリート保護工マニュアル発行（日本道路公団 試験研究所）

2000年（平成12年）：コンクリート片はく落防止マニュアル発行（日本道路公団 試験研究所）

2000年（平成12年）：東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準発行
（日本鉄道施設協会），
→ 2009年（平成21年）改正（表 2.1.2.5）

2000～2003年（平成12～15年）：

コンクリート構造物への表面被覆および表面改質技術の適用性研究小委員会[325委員会]（土木学会）

2001年（平成13年）：「コンクリート構造物補修の手引き」内に表面処理材料規格値制定（西日本旅客鉄道）

2002年（平成14年）：土木コンクリート塗装マニュアル発行（日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会）

2002年（平成14年）：表面処理材の基本規格値・認定規格値制定（西日本旅客鉄道）

2003年に規格値を一部改訂，2005年（平成17年）同内容に改訂，2008年（平成20年）規格値を一部改訂

2005年（平成17年）：表面保護工設計施工指針（案）発行（土木学会）

2009年（平成21年）：表面処理材の基本規格値・認定規格値改訂（西日本旅客鉄道）

（表 2.1.2.6，表 2.1.2.7）

(2) コンクリート構造物への表面被覆工法適用に関する主な性能評価基準

1) 表 2.1.2.1に1984年（昭和59年）に制定された**日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説**に掲載されている「塗装材料の品質」を示す．なお，本書には付録1 コンクリート塗装材料の品質試験方法（案）および付録2 塗料規格（案）が掲載されている．**道路橋の塩害対策指針（案）・同解説**では，総合系としての塗装の品質を満足するだけでなく，その塗装系で使用される構成材料としての各塗料（9種類）についても品質が確保されることが求められている¹²⁾．

以下に掲載されている塗料名を示す．

- ① DK-CP-1 エポキシ樹脂プライマー
- ② DK-CP-2 ポリウレタン樹脂プライマー
- ③ DK-CP-3 エポキシ樹脂塗料中塗り
- ④ DK-CP-4 柔軟型（形）エポキシ樹脂塗料中塗り
- ⑤ DK-CP-5 柔軟型（形）ポリウレタン樹脂塗料（用）中塗り
- ⑥ DK-CP-6 厚膜型（形）エポキシ樹脂塗料中塗り
- ⑦ DK-CP-7 厚膜型（形）ビニルエステル樹脂塗料中塗り
- ⑧ DK-CP-8 ポリウレタン樹脂塗料上塗り
- ⑨ DK-CP-9 柔軟型（形）ポリウレタン樹脂塗料上塗り

表 2.1.2.1 塗装材料の品質（道路橋の塩害対策指針（案）・同解説）¹²⁾

塗装系種別 項目	A種	B種	C種
塗膜の外観	塗膜は均一で，流れ・むら・われ・はがれの無いこと		
耐候性	促進耐候試験300時間行ったのち，白亜化はほとんど無く，塗膜にわれ，はがれの無いこと		
しゃ塩性	塗膜の塩素イオン透過量が $10^{-2}\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{日}$ 以下であること		
耐アルカリ性	水酸化カルシウムの飽和溶液に30日間浸漬しても，塗膜にふくれ・われ・はがれ・軟化・溶出の無いこと		
コンクリートとの付着性	25/25であること		
ひび割れ追従性	塗膜の伸びが1%以上あること	塗膜の伸びが4%以上あること	塗膜の伸びが1%以上あること

2) 1988年（昭和63年）に、日本道路公団試験研究所より日本道路公団 維持管理要領(橋梁編)、第3編コンクリート構造物[Ⅱ]高欄・地覆、塗装材料規格が発行され、1997年（平成9年）3月から北陸、沖縄、東京の3か所で実施した暴露10年後の追跡調査結果¹⁰⁾に基づき2008年（平成20年）に改正された東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社（以下「NEXCO」という.）の構造物施工管理要領 コンクリート表面被覆材の性能照査項目を表 2.1.2.2に示す。前項2.1.1でも記したように、耐久性試験として評価項目に「耐湿性試験後の塗膜の外観」が追加され、高湿度環境に7日間曝したのちの塗膜外観評価を行うものである。なお、高湿度環境が想定される場合は10日間の耐湿性試験を実施することとしている¹³⁾。

表 2.1.2.2 コンクリート表面被覆材の性能照査項目（NEXCO）¹³⁾

項 目	試験条件	規 格
塗膜の外観	標準養生後	塗膜は均一で、流れ・むら・ふくれ・われ・はがれの無いこと
	促進耐候性試験後	白亜化はなく、塗膜にふくれ・われ・はがれの無いこと
	温冷繰り返し試験後	塗膜にふくれ・われ・はがれの無いこと
	耐アルカリ性試験後	塗膜にふくれ・われ・はがれの無いこと
	耐湿性試験後	7（10）日間で塗膜に膨れ・割れ・はがれの無いこと ^{注1)}
しや塩性	標準養生後	塗膜の塩素イオン透過量が $5.0 \times 10^{-3} \text{mg/cm}^2$ 日以下
酸素透過阻止性	標準養生後	塗膜の酸素透過量が $5.0 \times 10^{-2} \text{mg/cm}^2$ 日以下
水蒸気透過阻止性	標準養生後	塗膜の水蒸気透過量が 5.0mg/cm^2 日以下
中性化阻止性	中性化促進試験	中性化深さが1.0mm以下
コンクリートとの 付着性	標準養生後	塗膜とコンクリートとの付着強度が 1.0N/mm ² 以上
	促進耐候性試験後	
	温冷繰り返し試験後	
	耐アルカリ性試験後	
ひび割れ追従性	標準養生後 （常温時）	塗膜の伸びが0.4(0.8) ^{注2)} mm以上
	標準養生後 （低温時）	塗膜の伸びが0.2(0.4) ^{注3)} mm以上
	促進耐候性後 （常温時）	

注1) 高温多湿環境に使用するものは、10日間とする。

注2) ひび割れ追従性を特に必要とするものは0.8mm以上とする。

注3) ひび割れ追従性を特に必要とするものは0.4mm以上とする。

3) 阪神高速道路(株)が発行している**コンクリート構造物表面保護要領**では、コンクリート構造物の部位や使用される条件等により、

- ① 予防保全を対象とした**A種**
- ② 中防食を対象とした**B・C種**
- ③ 重防食を対象とした**D種**
- ④ 耐汚染性を対象とした**E種**
- ⑤ **ASR**を対象とした**F種**

の全6種類に分類されている¹⁴⁾。保護工の各分類を表 2.1.2.3に、各仕様の要求される性能レベルを表 2.1.2.4に示す。

表 2.1.2.3 コンクリート表面保護工の分類¹⁴⁾

分類	コンクリート構造物の部位，使用条件等
A種	コンクリートの質感を生かした予防保全に用いる仕様 (撥水系[含浸]・セメント系)
B種	既設の鉄筋コンクリート，プレストレストコンクリート構造物の中性化による劣化，もしくはひび割れ，鉄筋腐食等が発生したコンクリートの補修，新設の鉄筋コンクリート，プレストレストコンクリート構造物の中性化や塩害の予防保全に用いる仕様
C種	劣化の進行により，コンクリート片のはく落による第三者に対する障害が懸念される部位に用いる仕様
D種	塗り替えが困難な部位や，特に著しい腐食が予想される環境（主に塩害環境）に置かれた構造物等の特定部位に用いる重防食仕様
E種	排気ガスやほこりによる汚れを防止もしくは軽減するために用いる仕様
F種	ASRによる劣化の補修に用いるための仕様（撥水系[含浸]・撥水系[塗膜]・防水系）

表 2.1.2.4 コンクリート表面保護工の性能一覧表¹⁴⁾

工法仕様 性能の種類	予防保全		中防食		重防食	耐汚染	ASR		
	A種		B種	C種	D種	E種	F種		
	撥水系 (含浸)	セメン ト系					撥水系 (含浸)	撥水系 (塗膜)	防水系
耐アルカリ性	水酸化カルシウムの飽和溶液に30日間浸漬しても外観変化，あるいは塗膜にふくれ，われ，はがれ，軟化，溶出のないこと．								
一体性（気中） (N/mm ²)	－	0.5 以上	0.7以上	母材破壊 または2 以上	0.7以上		－	0.3 以 上	0.3以上
一体性（水中・反水中） (N/mm ²)									
非吸水性 (g/m ² ・日)	3.5以下		1.0以下		1.2以下	2.5以下	3.5以下	3.5以 下	1.2以下
透湿性 (g/m ² ・日)	30以上	－	－	－	－	－	30以上	15以上	5以上
Cl ⁻ 遮断性 (mg/cm ² ・日)	(10 ⁻² 以下)	10 ⁻² 以下	10 ⁻³ 以下		(10 ⁻⁴ 以下) 10 ⁻³ 以下	－	－		－
O ² 遮断性 (mol/m ² ・年)	－	－	1.00以下		0.34以下	－	－		－
ひび割れ追従性(mm)	－	－	0.4以上		0.7以上	－	－	0.7以上	
耐候性(促進耐候性)	促進耐候性試験1500時間後，白亜化がほとんどなく，塗膜にわれ，はがれのないこと．				注1)	促進耐候性試験1500時間後，白亜化がほとんどなく，塗膜にわれ，はがれのないこと．			
耐候性(6か月暴露後)					色差0.50以下 光沢保持率90%以上				

注1) 促進耐候性試験3000時間後，白亜化がほとんどなく，塗膜にわれ，はがれのないこと．

4) 日本鉄道施設協会より2009年に改訂発行された、**東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準**を表 2.1.2.5に示す。本標準の対象とするコンクリート高架橋・RC桁は20年以上の耐久性が要求されており、再塗装等を行わないことが望ましいことから、表面被覆工法に適用される表面被覆材にも20年以上の耐久性が求められている。実際には20年以上の耐久性を確認した事例が少ないことから、さまざまな機関が設定した表面被覆工法に関する規格や耐久性試験結果をもとに品質規格を設定している¹⁵⁾。

表 2.1.2.5 東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準
コンクリート保護材の品質規格値¹⁵⁾

種 別		Ae種	A種	B種	C種
対象部位	高架橋	縦梁中央部 (下面・側面)	梁部ハンチ部 (下面・側面) 横梁部(下面・側面)	中央スラブ部	はねだしスラブ部
	RC桁	梁部中央部 (下面・側面)	梁部端部 (下面・側面)		はねだしスラブ部, 中央はねだしスラ ブ部, 中間スラブ部
(1)外観		塗膜は均一で、ながれ・むら・ふくれ・はがれのしないこと。			
(2)耐アルカリ性		水酸化カルシウムの飽和水溶液に30日間浸漬しても塗膜にふくれ・われ・はがれ・軟化・溶出のないこと。			
(3)耐候性		3000時間の促進耐候性試験を行った後、白亜化が極めてわずかであり、塗膜にわれ・はがれがなく、色の変化の程度が原状試験片と比べて大きくないこと。			
(4) 接着性	標準状態	1.0N/mm ² 以上			
	耐アルカリ性試験後	0.7 N/mm ² 以上			
(5)中性化阻止性		中性化深さ3mm以下(二酸化炭素濃度5%の促進状態で10週間静置後)			
(6)水蒸気透過性 促進耐候性試験後(3000時間)		1mg/cm ² ・日以下		5～ 10mg/cm ² ・日	10mg/cm ² ・日以下
(7)酸素遮断性 促進耐候性試験後(3000時間)		0.05mg/cm ² ・日以下			—
(8) 耐疲労性	標準養生後	塗膜のひび			
	促進耐候性試験後 (3000時間)	割れ・破断がないこと。	—	—	—
(9) ひび割れ 追従性	標準状態	—	0.6mm以上	0.4mm以上	—
	低温時(0℃)				
	促進耐候性試験後 (3000時間)		0.3mm以上	0.2mm以上	
(10)押し抜き荷重試験		—	—	—	1.5kN以上

5) 西日本旅客鉄道㈱の「コンクリート構造物補修の手引き〔第五版〕」に記されている表面処理材の基本規格値を表 2.1.2.6 に、表面処理材認定規格値を表 2.1.2.7 に示す。

西日本旅客鉄道㈱では、コンクリート構造物への表面被覆工法の適用に対し、1990 年（平成 2 年）に制定された山陽新幹線 RC 高架橋での表面被覆工法の試験方法・品質規格を適用していた。その後、平成 11 年に多発した山陽新幹線高架橋からのコンクリート片落下事故を契機に、山陽新幹線 RC 高架橋の早期劣化の主要因が中性化であることが判明。山陽新幹線 RC ラーメン高架橋の補修を行うにあたり、中性化進行の抑制を主目的として、表面被覆工法に求める性能を以下に示す①～④のように定め、5 年に亘る暴露試験および実構造物での追跡調査結果をもとに、表面処理材基本規格値および認定規格値の設定を行っている¹⁶⁾。

- ① 中性化阻止性能および耐久性能は「1.5mm 以下／20 年」を目標値とする
- ② 適切な施工管理システムが確立されている
- ③ 塗膜の劣化により将来的に母材に悪影響を与えない
- ④ 塗膜が劣化していない部分には重ね塗りの補修が出来る
- ⑤ 規制値を超える環境有害物質を周辺環境に放散しない

表 2.1.2.6 西日本旅客鉄道表面処理材基本規格値¹⁶⁾

規 格 項 目	試 験 方 法	規 格 値	記 事
中 性 化 阻 止 性	30℃, R.H.60%, CO ₂ 5%	28 日間促進, 平均 0.0mm	コンクリート配合 W/C=70%
促 進 耐 候 性	JSCE-K 511(キセノンランプ法)により 1,500 時間照射後, 「膨れ」「割れ」「はがれ」に異常がなく, かつ「光沢保持率」「色差」「白亜化」の測定項目のうち, 2 項目以上が規格値を満足すること。		
	JIS K 5600-8-2 (膨れ)	異常なし	
	JIS K 5600-8-4 (割れ)	異常なし	
	JIS K 5600-8-5 (はがれ)	異常なし	
	JIS K 5600-4-7(光沢保持率)	80%以上	
	JIS K 5600-4-6 (色差)	3.0 以下	
	JIS K 5600-8-6(白亜化)	0 または 1	
付 着 性	JSCE-K 531	1.0N/mm ² 以上	
酸素透過阻止性	製科研式 改良	1.5×10 ⁻² mg/cm ² ・day 以下	試験板にモルタル使用。
水 遮 断 性	JIS A 1404 改良	0.05g 以下	加圧時間 6 時間とする。
水 蒸 気 透 過 性	JIS A 1171 7.11	0.03mg/cm ² ・day 以上	放湿とする。
ひび割れ追従性	JSCE-K 532	0.3mm(促進) 0.6mm(常温)以上	
耐 アル カ リ 性	JIS K 5600-6-1	30day 浸漬, 「膨れ」「割れ」「はがれ」「軟化」「溶出」のそれぞれに異常がないこと。	試験板寸法 150×70×20mm, 飽和水酸化カルシウム溶液を使用, 試験板を水溶液に全没。
遮 塩 性	JSCE-E 530	5.0×10 ⁻³ mg/cm ² ・day 以下	試験板は 70×70×10mm のモルタルとする。

表 2.1.2.7 西日本旅客鉄道表面処理材認定規格値¹⁶⁾

性能項目	試 験 方 法	規 格 値	
中性化阻止性	暴露 1 年後, 3 年後, 5 年後 56 日間促進(30℃, R.H.60%, CO ₂ 5%)し, フェノールフタレイン 1%溶液を噴霧する.	0.0mm(3 面の平均値)	
酸素透過阻止性	暴露 1 年後, 製科研式改良	1.5×10 ⁻² mg/cm ² ・day 以下	
付着性	暴露 1 年後, 建研式単軸引張試験による.	1.0N/mm ² 以上	
耐候性	暴露 1 年後, 「外観」に著しい欠陥がないこと, かつ「光沢保持率」「色差」「白亜化」の測定項目のうち, 2 項目以上が規格値を満足すること.		
	JIS K 5600-8-2 (膨れ) JIS K 5600-8-4 (割れ) JIS K 5600-8-5 (はがれ)	外観	著しい変状がないこと.
	JIS K 5600-4-7	光沢保持率	70%以上
	JIS K 5600-4-6	色差	5 以下
	JIS K 5600-8-6	白亜化	0, 1 または 2
水遮断性	暴露 1 年後, JIS A 1404 改良	0.05g 以下	
水蒸気透過性	暴露 1 年後, JIS A 1171 7.11	0.03mg/cm ² ・day 以上	
ひび割れ追従性	暴露 1 年後, JSCE-K 532	0.3mm 以上	

以上, 主な機関が規定する, コンクリート構造物への表面被覆工法の適用に関する性能評価基準を記した.

多くの機関で採用している評価項目は, 一部の規格で付着性, ひび割れ追従性や遮断性で強制的に負荷を与え, 劣化後の二次物性としての性能を評価しているものもあるが, 大半が表面被覆材に負荷を与えずに試験を行うものである. また, その劣化方法の殆どは, 促進耐候性試験に代表される光エネルギーによる劣化が中心である. 中には, 湿潤状態や温冷繰り返し等の負荷をかける方法を採用している規格もあるが, 単独要因での負荷であり, 屋外暴露耐候性試験との相関性が掴めきれておらず, 負荷方法としての促進劣化方法の確立が必要である.

また, 表面被覆材による透過制御機能として求められる塗膜の緻密性を評価するには, 二酸化炭素, 塩化物イオン, 酸素, 水, 水蒸気の透過制御機能の評価する. 試験に用いる試験片は, 一部モルタル基板に塗装する規格もあるが, 殆どの規格がフリーフィルムでの試験方法を採用している. 実際のコンクリート構造物では, 躯体コンクリートに塗装仕様に従った塗装が施されているが, フリーフィルムでは主材+仕上げ材での試験が中心であり, 躯体コンクリートとの密着性に重要な働きをするプライマーの効果が加味されていない. さらに, これらの劣化因子を遮断できるよう, 躯体との密着性を評価することが重要である.

本来, 表面被覆工法として用いられる表面被覆材の耐久性を評価するには, 単に要求される性能を評価するだけでなく, 実際に劣化した表面被覆材の性能を評価しなければならない.

現在，適用されている試験方法は，初期の性能は抑えられるものの，劣化後の性能を予想するには十分な試験方法とは言えない．したがって，表面被覆材の耐久性を評価するには，採用する表面被覆工法に近い状態の試験片を用い，初期性能だけでなく，屋外暴露耐候性との相関のとれる促進試験を見だし，劣化後の二次物性を評価することで耐久性の評価を行うのが望ましい．

なお，表面被覆工法に用いられる表面被覆材の要求性能に対する主な機関の基準値を，表 2.1.2.8 に示す．

表 2.1.2.8 要求性能に対する主な機関の基準値一覧

分 類	要求性能		道路橋の塩害対策指針 (案)	コンクリート表面被覆材の性能照査	コンクリート表面保護工の性能	東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準	西日本旅客鉄道表面処理材基本規格値	西日本旅客鉄道表面処理材認定規格値	下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル 流布型ライニング工法の品質規格 日本下水道事業団
			日本道路協会	東日本・中日本・西日本高速道路㈱[NEXCO]	阪神高速道路㈱[HKK]	日本鉄道建設協会	西日本旅客鉄道㈱		
外 観	塗膜の外観	標準養生後	塗膜は均一で、流れ・むら・われ・はがれのないこと	塗膜は均一で、流れ・むら・ふくれ・われ・はがれのないこと	—	塗膜は均一で、ながれ・むら・ふくれ・はがれのないこと	—	—	被覆にしわ、むら、はがれ、われのないこと
		促進耐候性試験後	—	白亜化はなく、塗膜にふくれ・われ・はがれのないこと	—	—	—	—	—
		凍防凍り落し試験後	—	塗膜にふくれ・われ・はがれのないこと	—	—	—	—	—
		耐アルカリ性試験後	—	7(10)日間で塗膜に膨れ・割れ・はがれのないこと(高温多湿環境での使用は10日間)	—	—	—	—	—
長期 耐久性	耐候性 (促進耐候性)		促進耐候試験(サンシャイン)300時間行ったのち、白亜化はほとんど無く、塗膜にわれ、はがれのないこと	促進耐候試験機(サンシャイン)白亜化はなく、塗膜にふくれ・われ・はがれのないこと	A・B・C・E・F種：キセノン1500時間後、白亜化がほとんどなく、塗膜にわれ・はがれのないこと D種：キセノン3000時間後、白亜化がほとんどなく、塗膜にわれ・はがれのないこと	キセノン3000時間の促進耐候性試験を行った後、白亜化が極めてわずかであり、塗膜にわれ・はがれがなく、色の変化の程度が原状試験片と比べて大きくないこと	キセノン1500時間照射後、「膨れ」「割れ」「はがれ」に異常がなく、かつ「光沢保持率」「色差」「白亜化」の測定項目のうち、2項目以上が規格値を満足すること	—	—
	耐候性 (6か月暴露)		—	—	色差：0.5 光沢保持率：90%以上	—	—	暴露1年後、「外観」に著しい欠陥がないこと、かつ「光沢保持率」「色差」「白亜化」の測定項目のうち、2項目以上が規格値を満足すること	—
	耐疲労性	標準養生後	—	5.0×10 ⁻² mg/cm ² 日以下	B・C種：1.00mol/m ² ・年以下 D種：0.34mol/m ² ・年以下	Ae種：塗膜のひび割れ・破断がないこと	—	—	—
		促進耐候性試験後(3000時間)	—	—	—	—	—	—	—
耐薬品性	押し抜き荷重試験		—	—	—	1.5kN以上	—	—	—
	耐アルカリ性		水酸化カルシウムの飽和溶液に30日間浸漬しても、白亜化はほとんど無く、塗膜にふくれ・われ・はがれ・軟化・溶出のないこと	塗膜にふくれ・われ・はがれのないこと	水酸化カルシウムの飽和溶液に30日間浸漬しても外観変化、あるいは塗膜にふくれ、われ、はがれ、軟化、溶出のないこと。	水酸化カルシウムの飽和溶液に30日間浸漬しても塗膜にふくれ・われ・はがれ・軟化・溶出のないこと	30day浸漬、「膨れ」「割れ」「はがれ」「軟化」「溶出」のそれぞれに異常がないこと	—	水酸化カルシウム飽和溶液に A・B種：30日間浸漬 C種：45日間浸漬 D種：60日間浸漬 評価：被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと
	耐酸性		—	—	—	—	—	—	A種：pH3の硫酸水溶液に30日間浸漬 B種：pH1の硫酸水溶液に30日間浸漬 C種：10%の硫酸水溶液に45日間浸漬 D種：10%の硫酸水溶液に60日間浸漬 評価：被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと
	耐塩性		—	—	—	—	—	—	—
付着性	コンクリートとの付着性	標準養生後	気中養生 25/25	—	A種(セメント系)：0.5N/mm ² 以上 B・D・E種：0.7N/mm ² 以上 C種：母材破壊または2N/mm ² 以上 F種(撥水系塗膜、防水系)：0.3N/mm ² 以上	1.0N/mm ² 以上	1.0N/mm ² 以上	暴露1年後 1.0N/mm ² 以上	標準状態：1.5MPa以上、吸水状態：1.2MPa以上
		水中養生	—	—	—	—	—	—	—
		反水中養生	—	1.0N/mm ² 以上	—	—	—	—	—
		促進耐候性試験後	—	—	—	—	—	—	—
遮断性	中性化阻止性	凍防凍り落し試験後	—	—	—	—	—	—	—
		耐アルカリ性試験後	—	—	—	0.7N/mm ² 以上	—	—	—
		耐湿性試験後	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
	水遮断性	—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
	非吸水性	—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
	透湿性 水蒸気透過阻止性	標準養生後	—	5.0mg/cm ² 日以下(フリーフィルム)	A・F種(撥水系)：3.5g/m ² ・日以下 B・C種：1.0g/m ² ・日以下 D・E・F(防水系)種：1.2g/m ² ・日以下	Ae・A種：1mg/cm ² ・日以下 B種：5～10mg/cm ² ・日 C種：10mg/cm ² ・日以下(フリーフィルム)	0.03mg/cm ² ・day以下(放湿) (モルタル基板)	暴露1年後 0.03mg/cm ² ・day以上(放湿) (モルタル基板)	—
		促進耐候性試験後(3000時間)	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
	酸素透過阻止性	標準養生後	—	5.0×10 ⁻² mg/cm ² 日以下(フリーフィルム)	B・C種：1.00mol/m ² ・年以下 D種：0.34mol/m ² ・年以下 (フリーフィルム)	Ae・A・B種：0.05mg/cm ² ・日以下(フリーフィルム)	1.5×10 ⁻² mg/cm ² ・day以下 (製剤研改良)	暴露1年後 1.5×10 ⁻² mg/cm ² ・day以下 (製剤研改良)(モルタル基板)	—
		促進耐候性試験後(3000時間)	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
	塩化物イオン透過阻止性 遮塩性	—	10 ⁻² mg/cm ² ・日以下(フリーフィルム)	5.0×10 ⁻³ mg/cm ² 日以下(フリーフィルム)	A種：10 ⁻² mg/cm ² ・日以下 B・C種：10 ⁻³ mg/cm ² ・日以下 D種：10 ⁻⁴ mg/cm ² ・日以下 (モルタル基板)	—	5.0×10 ⁻³ mg/cm ² ・day以下 (モルタル板)	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—
	硫酸侵入深さ		—	—	—	—	—	—	10%硫酸水溶液に120日間浸漬した時の侵入深さが設計厚さに對して C種：10%以下かつ200μ以下であること D種：5%以下かつ100μ以下であること
ひび割れ 追従性	ひび割れ追従性	標準養生後 (常温時)	塗膜の伸びが1%以上 (A・C種)	0.4(0.8)mm以上 (ひび割れ追従性を特に必要とする場合：0.8mm以上)	B・C種：0.4mm以上 D・F種(撥水系塗膜、防水性)：0.7mm以上	A種：0.6mm以上 B種：0.4mm以上 C種：0.3mm以上(0℃) D種：0.2mm以上(0℃)	—	暴露1年後 0.3mm以上	—
		標準養生後 (低温時)	塗膜の伸びが4%以上 (B種)	0.2(0.4)mm以上(5℃) (ひび割れ追従性を特に必要とする場合：0.4mm以上)	—	—	—	—	—
		促進耐候性後 (常温時)	—	0.2(0.4)mm以上(700時間) (ひび割れ追従性を特に必要とする場合：0.4mm以上)	—	A種：0.3mm以上(3000時間) B種：0.2mm以上(3000時間)	—	—	—

2.2 実構造物に施工された表面被覆工法の追跡調査

2.1節でも述べたように、2005年（平成17年）に土木学会から出版された**表面保護工法設計施工指針(案)**では、コンクリート塗装を体系化する試みとして有機系14工法および無機系6工法の施工事例が紹介されている。コンクリート塗装が始まって30年以上を経過し、これまでに実構造物での試験塗装が数多くなされている。試験塗装開始後10年の追跡調査結果の一例として、1995年（平成7年）年度より、旧日本道路公団 四国支社 高松技術事務所にて開始した、比較的長期にわたって調査されている高知県浦戸大橋の試験塗装について、10年目の追跡調査を一般財団法人 日本塗料検査協会が西日本高速道路エンジニアリング関西(株)とともにに行った事例を以下に示す。

・高知県 浦戸大橋^{17) 18) 19)}

旧日本道路公団 四国支社で管理していた浦戸大橋は、昭和44年に着工し47年に供用された。この橋は高知港入り口の浦戸湾に架設され厳しい環境下にあり、コンクリート構造物および橋梁付属物等の損傷が確認され、平成5年に旧日本道路公団 高松建設局において橋梁補修をめざしたコンクリート構造物（四国地区）の耐久性に関する検討が開始された。旧日本道路公団では平成6年度にコンクリート補修材料8仕様について橋脚4本を対象に試験塗装を行い、同時に同一8仕様と新たに2仕様を加えた合計10仕様の試験片を作製して浦戸料金所の用地内に暴露試験を開始した。旧日本道路公団のコンクリート補修材の基準は壁高欄および地覆を対象とした基準のみであり、今回の対象は塩害防止および中性化阻止を目的とし、上塗塗料に耐候性の優れたふっ素樹脂塗料を用いた寿命の長い塗装仕様を選定する目的で試験塗装を実施した。

浦戸大橋は産業・物流・観光など社会的に必要不可欠な道路網の一部となっており、交通量の順調な伸びにより、当初の償還予定（平成14年）が早まることとなった。移管を前提とした補修・補強等の計画を算定する必要が出てきたため、平成5年に「コンクリート構造物（四国地区）の耐久性に関する検討業務」の委員会において、詳細調査から対策工および追跡調査を行い、補修・補強等を実施することとなった。

この浦戸大橋は浦戸湾内入口に架橋されており、海風等、塩害の影響を受けやすい環境条件であることから、過去よりひび割れ状況、鉄筋腐食状況、硬化コンクリート中の塩化物イオン含有量、中性化深さ、橋梁付属物などの現況調査を行ってきた。調査結果から構造上問題となるような損傷は発生していないことが確認されたが、コンクリート構造物の許容ひび割れ幅（[基準]土木学会： $0.0035C=0.4\text{mm}$ （ C ：鉄筋かぶり））以上、コンクリート中の塩化物イオン含有量（[基準]JH 技術手帳：（ NaCl 換算値） 1kg/m^3 ）以上、鉄筋腐食（全面に発錆・点錆・浮き錆）、中性化深さ（[基準]岸谷式により中性化速度の提案式）以上となっているところがあった。

今後、維持管理していく上において、平成5年～6年度に耐久性、劣化阻止、美観を目的とした対策工法が検討され、コンクリート保護と美観を目的としたコンクリート塗装による保全が決定された。塩害防止および中性化防止と耐久性を考慮した塗装仕様を各メーカーにアンケート調査し、回答および提出のあった8仕様について、上塗りを耐候性に優れたふっ素樹脂塗料とし、試験研究所技術資料第121号（施工材料研究会）のコンクリート塗装材の品質規

格に示す「一般的な劣化」を中性化防止用、海浜部に近い所には塩害用に合致したものを採用した。

なお、各塗装仕様については、材料施工研究会の中に設置された「コンクリート保護工研究会」^{備考(1)}が塗料メーカーに塩害用・中性化用塗装仕様としてアンケート調査した結果、「コンクリート塗装材の品質規格に適合する塗装仕様（案）」として選定した。なお、塩害用の上塗り材は耐候性と耐久性を考えてふっ素樹脂系を指定した。

- ・塩害仕様：塩化物イオン、酸素、水、炭酸ガス等、コンクリート中の鉄筋への腐食物質の透過浸透を抑制する一般的なコンクリート保護適性を有し、コンクリートの強アルカリによって劣化せず、コンクリートとの付着の良好なものであることと同時に、耐候性およびヘアクラックに追従するひび割れ追従性が要求される仕様とした。

主材（ポリブタジエンゴム系、エポキシ系）

- ・中性化仕様：コンクリートに対する一般的な適性以外に、特に遮塩性、ひび割れ追従性の優れた性能を有する仕様とした。

主材（ウレタン系（柔軟型を含む）、エポキシ系（柔軟型を含む））

平成6年度には塩害仕様（4仕様）、中性化仕様（4仕様）について施工性、仕上がり（美観）等を確認するために試験施工を実施し、実構造物についての追跡調査を実施している。また、同時期に同一試験条件で試験を行う目的で暴露供試体を作製し、実構造物では実施不可能な破壊調査用として経年変化を追うこととした。なお、暴露供試体調査結果については参考文献17)および18)を参照願いたい。

試験施工された表面被覆工法を10年間に亘り追跡調査を行った結果、塩害仕様については2仕様の塗装が重なっている角部で膨れ・ちぢみが発生している。また、当初から躯体に損傷がある部分（打継部等）については、試験室内での試験片によるひび割れ追従性試験では問題なかったが、実構造物ではひび割れ等の欠陥が現れており、徐々にではあるがそのひび割れ幅は経時的に拡大している。それ以外については顕著な損傷は見られず、中性化仕様の橋脚については構造物自体に欠陥は全く確認されない状況である。

備考(1) 共同研究的に材料・施工に関する研究を行うことを目的として、平成5年7月、旧日本道路公団試験研究所研究推進委員会の分科会に「材料施工研究会」が設置された。その中に、民間団体等の代表と試験研究所の関連研究室とで構成された研究会として、「コンクリート保護工研究会」が設立された。

2.3 コンクリート構造物に適用される表面被覆工法に関する研究および調査報告

2.3 節では、コンクリート塗装に関し、過去に実施された代表的な研究および調査報告についてとりまとめる。

(1) コンクリート補修材の品質特性—コンクリート塗装材・断面修復材・鉄筋防錆材—⁶⁾

豊福 俊泰，吉岡 博幸，用害 比呂之

日本道路公団試験所報告，Vol.25，pp.73-86，1988

コンクリート構造物の補修方法として、その補修に塗装材等を組み合わせたライニング

工法が用いられつつあった。この報告では、これらの材料の品質特性、耐久性を暴露試験により確認し、その結果、当時市販されている製品の品質にはかなりのばらつきがあり、各種の機能および耐久性の点で問題のある材料があることが示されている。これらの試験結果をもとに、塗装材の品質規格として、日本道路公団 維持管理要領(橋梁編)、第3編コンクリート構造物[Ⅱ]高欄・地覆、塗装材料規格を作成した。

(2) 暴露試験と促進試験によるコンクリート塗装材の性能検討⁹⁾

吉田 敦，濱田 達也，本村 均

日本道路公団試験研究所報告，Vol.37，pp.85-95，2000.11

現状のコンクリート塗装材の新たな基準試験方法を提案するため、室内での促進試験および暴露試験結果と併せて検討を行った。

- ① 外観・遮塩性・ひび割れ追従性で、当時の品質基準を満足できない塗装仕様が多い。
- ② 北陸地方暴露では主材が有機系の方が、ポリマーセメント系より遮塩性が著しく低下。
- ③ 沖縄地方暴露では、他の暴露場の仕様よりも付着力が低下した塗装仕様が多い。

また、ひび割れ追従性試験では、暴露試験と促進試験の差が大きく、塗装仕様によっては促進条件が必ずしも劣化現象の促進にならない場合があった。

(3) 塗装系防食材の追跡調査に基づく耐久性能評価と付着性能評価手法の提案¹⁷⁾

樺山好幸，吉田幸信，吉田敦，山田卓司，宮川豊章

コンクリート工学論文集，Vol.14，No.3，pp.11-22，2003.3

本報は、高知県浦戸湾に架かる浦戸大橋を対象に実施した、実橋での表面被覆工法 7 年目追跡調査に基づき、耐久性能評価結果と設計・施工の基本事項および付着性能評価手法の提案をまとめたもの。

- ① 塩害仕様については、塗膜の重なる角部において膨れ・縮みが、また、当初から躯体に損傷のある部分（特に打継部等）については、試験室内での試験片によるひび割れ追従性試験では問題なかったが、実構造物ではひび割れ等の欠陥が発生。それ以外については顕著な損傷は確認できず、中性化仕様では欠陥は認められなかった。
- ② 付着性能については、単軸引張による付着強度試験との相関傾向が認められず、塗膜のはく離現象に着目した「見かけのはく離抵抗性試験」の併用が提案されている。
- ③ 塗膜の粘弾測定結果より、従来の 28 日養生では各材料の架橋反応は終結していないことが判明。少なくとも塗膜の硬化には、6 か月程度の養生期間が必要。
- ④ 塗膜の内部応力と「見かけのはく離抵抗性」の破断箇所との一致性が認められた。
- ⑤ 塗装系防食材の施工では、下地処理、施工環境等、施工条件（禁止条件、ケレン状態、結露環境）を明確にして実施する必要があることが示されている。

(4) コンクリート構造物の塗装系防食材の追跡調査に基づく評価¹⁹⁾

安藤 幹也，藤原 俊明，山本 雅貴，山田 卓司

第 5 回 コンクリート構造物の補修補強アップグレードシンポジウム論文報告集第 5 巻，pp.399-404，2005.10

前述(3)「塗装系防食材の追跡調査に基づく耐久性能評価と付着性能評価手法の提案」で述べた浦戸大橋 7 年目の実橋での追跡調査に引き続き, 10 年目の追跡調査についての報告.

- ① 外観調査については, 塩害仕様は特定部位について一部の仕様に縮みや割れ等の欠陥はあるものの, 全体的には十分保持されていた. ただ, 試験室内での試験片によるひび割れ追従性試験では問題なかったが, 実構造物での割れは経時的に拡大・進行状況下にある. 中性化仕様では現時点で特に問題はない.
- ② 施工時の注意として, コンクリート打継部の施工は, 打ち継部付近に生じる躯体自身の動きによる塗膜ひび割れの拡大を最小限度に抑えるために, 入念な下地処理が必要.
- ③ 付着性能については, 塗膜の経年経過により徐々に進行・低下している. また, はく離した仕様の半数が, プライマーが関与していると思われる基板付近と不陸調整材との間ではく離しており, 塗膜の経年的硬化収縮に伴うコンクリート基板付近での劣化がうかがわれた.
- ④ 全仕様においてひび割れ追従性能は室内試験で満足していたが, 実橋脚の塗膜ではひび割れが発生・増加しており, 今後, 実状にあった試験方法を検討する必要があることが判明した.

(5) コンクリート表面被覆材の耐久性向上に関する検討 ¹⁰⁾

竈本 武弘, 野島 昭二, 藤田 庫雄

コンクリート工学, Vol.47, No.2, 2009.2

コンクリート表面被覆材耐久性向上に向けた基準改訂 ¹¹⁾,

竈本 武弘, 野島 昭二

NEXCO 技術情報, 第 7 号, 2009.3

NEXCO 総研では平成 19 年に暴露 10 年後の追跡調査を実施した. 実構造物での調査結果および暴露 10 年後の追跡調査結果より, 耐久性能を評価する試験方法の見直しが必要と考え, 表面被覆工法に用いられる表面被覆材の耐久性向上に向けた新たな試験方法 (耐湿性) の検討を行った結果. その耐久性のある被覆材を適切に選定するには, 「耐湿試験後の外観」を評価項目に加える必要性が明らかになった.

(6) 再アルカリ化工法適用後のコンクリートに対する塗膜の適応性に関する検討 ²⁰⁾

野村 倫一, 山田 卓司, 石橋 孝一

コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, 2003

再アルカリ化工法適用後のコンクリートの pH 値長期維持の対策とし, コンクリート表面処理工がある. しかしながら, 再アルカリ化工法適用後のコンクリートは, 含水率が高く, 通常用いている塗膜では適応が困難であることが想定されるため, 実験により種々の塗膜の適応性について検討した. 適応できる表面処理工法は少なく厳しい条件であることが改めて確認された. 耐水試験後の外観評価が良好で, 促進劣化試験後の耐水試験後の付着強さや見かけのはく離強さ (見かけのはく離抵抗性) に変化のない厚膜形エポキシ樹脂系, ウレア樹脂系, 外観変状の少ないエポキシ樹脂系については, 再アルカリ化に問題ないも

のとして実構造物に試験施工を実施した。

(7) 再アルカリ化後に施工した表面被覆工法の経年調査結果²¹⁾

野村 倫一，山田 卓司，荒木 弘祐

土木学会次学術講演会，Vol.66，2011

施工 6 年後の暴露供試体および実高架橋の経年調査を実施。暴露供試体での中性化深さ測定では，どの工法も塗膜付近で濃い赤色を呈さず，ほとんどの仕様で薄いピンクを示したため，正確な評価を行うには pH 測定が必要であることが判明した。いずれの工法も pH11 以上は保たれているものの，水中硬化形エポキシ，エポキシにセメントを混合した仕様以外は経年による変化が見られた。特に主材にウレア樹脂を用いた工法については実高架橋において，鉄筋位置に沿った変色や付着強度低下が生じ，再アルカリ化の影響による塗膜の劣化が確認された。

(8) 山陽新幹線 RC 高架橋に適用する表面被覆工法の評価方法について²²⁾

渡辺 佳彦，荒巻 智，松田 好史，山田 卓司，宮川 豊章

材料，Vol.58，No.8，pp691-696，2009.8

西日本旅客鉄道(株)では，表面被覆工法における具体的な要求性能を明らかにして規格改訂を行うため，平成 13 年より表面被覆工法の実高架橋による現地試験および試験体を用いた暴露試験を実施した。なお，試験施工を行った高架橋では，施工 1 年後の外観調査で，多くの工法でラーメン高架橋縦梁中央部に微細なひび割れが発生していた。

規格値は，暴露試験で得られた値をもとに決定。また，試験施工で実施した試験項目に加え，ひび割れ追従性試験を追加することとした。

- ① 試験は室内試験と暴露試験の 2 種類を実施。
- ② 暴露試験の中性化阻止性は暴露 1 年，3 年および 5 年後で評価を行う。付着性，塗膜の耐久性および鉄筋腐食抑制性能は暴露 1 年後に評価する。
- ③ 暴露試験の中性化阻止性は，供試体の W/C を 70%とし，暴露後の中性化促進期間を 56 日間とする。

(9) 各種表面被覆材の長期内陸・海洋暴露による耐久性能²³⁾

宮下 剛，元売 正美，椎名 貴快，荒木 昭俊，岸 利治

土木学会年次学術講演会，Vol.67，pp.251-252，2012.9

表面被覆工法に用いられる有機系・無機系 9 種類の表面被覆材を対象に，最長 9 年間に亘る内陸・海洋環境下での長期暴露試験を実施し，暴露試験による表面被覆工法の耐久性（接着強度，色差，光沢，表面変状）についての試験結果報告。

- ① 各種表面被覆工法の接着強度は概ね良好であり，長期暴露でも規準を満足する接着耐久性を保持。内陸より海洋暴露の方が小さい傾向を示した。
- ② 色変化や光沢変化は，工法の種類によって違いがあったが，ウレタン樹脂系やふっ素樹脂系の材料は，比較的变化の小さい上塗り材料であった。また，初期より光沢値の低い材料は経年で汚れ等の影響もあり，色変化は比較的大きい傾向を示した。

- ③ 表面の色・光沢は変化しているが，接着強度は十分に高く，表面被覆工法としてのコンクリート保護機能は内陸・海洋を問わず健全であり，特にふっ素樹脂系上塗りを用いた仕様の性能が優れていた．

(10) 付着性能による表面被覆工法の耐久性評価手法について ²⁴⁾

山田 卓司，佃 洋一，勝井 要，渡辺 佳彦，宮川 豊章

材料，Vol.60，No.8，pp715-720，2011.8

表面被覆工法に用いられる表面被覆材の付着性を評価する際，主に単軸引張により，鉛直方向に対する付着強度が採用されている．しかし，多くの場合基板破壊を示し，工法間での性能比較が困難な場合が多い．今回，付着強度試験に加え，塗膜をはがすことをイメージした見かけのはく離抵抗性試験を，付着性評価として実施した．

付着強度試験で基板破壊した試料の中で，見かけのはく離抵抗性試験を行うことで塗膜のはく離現象が確認できた．一部の工法では，破壊箇所が経時的に変化しているものもあり，双方の試験方法を併用することで，多方面から付着性を評価することが可能となった．

(11) 表面保護工を中心としたコンクリート構造物のアップグレード技術の現状と将来展望

コンクリート構造物の補修・補強対策における重要な位置を占める表面保護工での合成高分子材料，複合材料の適用について，材料や技術の変遷，適用事例および規格・試験方法の観点から，コンクリート構造物の維持管理の概論および表面保護工を含むコンクリート構造物のアップグレード技術の概要をまとめた連載講座．なお，本講座は，材料，Vol.60，No.11，2011.11～Vol.61，No.2，2012.2 に掲載されている．

(11)-1 コンクリート構造物のアップグレード技術総論 ²⁵⁾

山本 貴士，宮川 豊章

材料，Vol.60，No.11，pp1049-1055，2011.11

コンクリート構造物の維持管理の概論および表面保護工を含むコンクリート構造物のアップグレード技術の概要をまとめたもの．

コンクリート構造物に対するより一層の維持管理シナリオの充実に向け，補修，補強，アップグレード技術，表面保護工の研究，技術の発展が欠かせず，これらの技術によって裏打ちされた維持管理を含めた生涯シナリオを創造することで始めて適切なストックマネジメントが可能としている．

(11)-2 表面保護工を中心とする材料・技術の変遷 ²⁶⁾

国枝 稔，城田 常雄，堀井 久一，山本 高広，得能 敏巳

材料，Vol.60，No.12，pp1149-1155，2011.12

既存のコンクリート構造物を適切に維持管理し，使いこなしていくには適切な診断結果をもとに，適切な方法によって補修・補強が行わなければならない．そのためには，外部からの劣化環境因子の侵入を阻止，あるいは抑制することが求められており，その際に有効な工法の一つとして表面保護工が挙げられる．表面被覆工法，断面修復工法，表面含浸

工法を対象とし、材料や技術の変遷をまとめた。

(11)-3 適用事例 ²⁷⁾

濱田 秀則，野村 倫一，新名 勉，渡辺 博志，寺田 典生

材料，Vol.61，No.1，pp89-95，2012.1

実構造物に適用された事例あるいは実環境での暴露試験事例を紹介し、道路構造物、鉄道構造物および海洋構造物（港湾構造物）に適用された事例、およびその結果どの程度の効果が得られているかをとりまとめたもの。

(11)-4 表面保護工を対象とした各種試験方法と今後の課題と将来展望 ²⁸⁾

山田 卓司，江口 和雄，濱田 秀則，宮川 豊章

材料，Vol.61，No.2，pp203-209，2012.2

表面保護工を対象とした各種試験方法と今後の課題と将来展望として、①コンクリート構造物の補修補強材料に関する土木学会規準であるKシリーズ（2010年版）の概要紹介、②補修用樹脂小委員会にて実施している、表面被覆材の性能を統一条件下で包括的に評価する屋外暴露による共通試験の暴露3年後までの「塗膜の外観、付着性能（付着強度、見かけのはく離抵抗性）²⁹⁾、ひび割れ追従性、透水性」に関する試験結果の紹介、③補修工法別に見た試験方法の変遷および今後求められる試験方法等について概説。

(12) 表面被覆工法の付着特性に着目した耐久性評価方法に関する研究 ²⁹⁾

山田 卓司，佃 洋一，山本 貴士，国枝 稔，宮川 豊章

材料，Vol.61，No.10，pp.715-720，2012.10

表面被覆材の耐久性に重要な関わりを持つ付着性に着目し、基板破壊のため比較困難であった性能を検討するため、従来から実施されている鉛直方向に対する付着強度に加え、はがれ現象を考慮した評価手法の検討。

付着性を評価する際、従来の単軸引張による付着強度試験だけでなく、塗膜のはく離現象を考慮したカッターナイフはく離試験や見かけのはく離抵抗性を併用することで、これまで付着強度試験で基板破壊のため比較困難であったものが、その違いを評価・考察する一助になるものと考えられる。結果、双方の試験方法を併用することで、多方面から付着性を評価することが可能となった。

2.4 まとめ

本章では、既往の研究として、

① コンクリート構造物への表面被覆工法適用に対する取り組み

[(1)，(6)，(11-1)，(11-2)，(11)-4]

② コンクリート構造物に適用される表面被覆工法の性能評価基準の変遷 [(8)，(11)-4]

③ 実構造物に施工された表面被覆工法の追跡調査

[(2)，(3)，(4)，(5)，(7)，(9)，(11-3)，(12)]

④ コンクリート構造物に適用される表面被覆工法に関する研究および調査報告

について述べた。なお、[]にある数字は、2.3 節に掲載した研究および調査報告の文献番号である。

コンクリート塗装に関する国内の最初の本格的な基準として「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説¹²⁾」が、1984 年（昭和 59 年）2 月に発行（社団法人 日本道路協会）されて以来 30 年を迎えようとしている今、多くの研究者が行ってきた研究・調査の成果により、制定当時では想定しきれなかった事象やコンクリート構造物の劣化機構等が、徐々に明らかとなってきた。また、「塗装」というコンクリート構造物を守る手法についても、コンクリートの劣化状況に合わせ、システムの適用されることでその効果が発揮されている。一方、2.2 節および 2.3 節(3)¹⁷⁾、(4)¹⁹⁾にもあるように、室内試験でのひび割れ追従性は良好であるが、実構造物では十分な性能が発揮できていない等、供試体での試験結果と実構造物での性能が必ずしも一致していない事例もある。また、付着性についても 2.2 節および 2.3 節(3)¹⁷⁾、(10)²⁴⁾、(12)²⁹⁾に示されているように、鉛直方向への単軸引張による付着強度試験とはがれる現象を考慮した見かけのはく離抵抗性試験では得られる結果が異なることが確認され、評価内容の着眼点を変えることで今まで見えていなかった現象が見えてくる等、表面被覆材に関する試験方法には検討すべき事柄がある。ただ、耐久性については実構造物での調査や暴露供試体での性能確認が最も重要であり、その性能を正しく評価するためにも、劣化状況を的確に把握できる試験方法の開発が望まれるところである。

本章では、主な機関で採用されている表面被覆工法適用に関する規格について整理した。表面被覆工法適用に関する表面被覆材の規格値を制定している機関では、実構造物による調査結果および供試体による暴露耐候性による耐久性試験結果を参考に、規格値および試験方法を見直すことで、より良い評価ができるよう改訂を実施している。しかし、2.1 節に記したように多くの機関で採用している評価項目は、その殆どが負荷をかけない初期物性にとどめられている。また、遮塩性のように遮断性を評価する試験方法では、試験片としてフリーフィルムを用いるのが大半であり、実構造物に施される表面被覆工法で用いられるプライマーの効果が加味されていない場合が多い。現在、適用されている試験方法は、初期の性能は抑えられるものの、劣化後の性能を予想するには十分な試験方法とは言えず、屋外暴露耐候性との相関のとれる促進劣化試験を見だし、劣化後の二次物性を評価することで耐久性の評価を行う等、改良しなければならない点がある。

本論文では、表面被覆工法の規格制定に対する要求性能についてまとめるとともに、主な機関で用いられている各項目に対する試験方法について概説し、その問題点を洗い出すことで、より良い表面被覆工法の耐久性を評価する試験方法の確立を目指すこととする。中でも表面保護工の劣化に対する抵抗性としては、表面被覆材の透過制御が挙げられる。適用される表面被覆材が、劣化因子を遮断できるよう躯体と密着し、割れない丈夫で柔軟な塗膜が要求される。したがって、耐久性を評価する試験方法の確立に関しては、表面被覆材の耐久性として重要な性能と考えられる「耐候性」、「付着性」および「ひび割れ追従性」に着目することとした。まず第一に、屋外暴露耐候性による付着性に関する経時劣化を評価する試験方法の検討を、従来から実施されている単軸引張による「付着強度試験」と塗膜のはがれる現象を考慮した「はく離試験」の 2 方法について検討を行う。さらに、屋外暴露耐候性試験とより良い相関関係を見出すべく、促進劣化試験として一般的な手法である「促進耐候性試験」

および試験環境の変化を重視した「耐久性サイクル試験」の2方法の有効性を検討する。なお、有効性を検討する評価項目は、耐候性後に発生する膨れや割れ等の塗膜欠陥や、経時的な変化が期待できる「付着性」および「ひび割れ追従性」に着目することとし、今後の表面被覆工法の耐久性を評価する試験方法の確立に役立てていく。

〔第2章 参考文献〕

- 1) 片脇 清士：コンクリート橋梁の劣化と対策（その 2），防錆管理，（社）日本防錆技術協会，2012.5
- 2) 渡辺 佳彦，荒巻 智，松田 好史，山田 卓司，宮川 豊章：山陽新幹線 RC 高架橋に適用する表面被覆工法の評価方法について，材料，Vol.58，No.8，pp691-696，2009.8
- 3) 土木学会：コンクリートの表面被覆材及び表面改質に関する技術の現状，コンクリート技術シリーズ No.58，2004.2
- 4) 片脇 清士：コンクリート橋梁の劣化と対策（その 7），防錆管理，（社）日本防錆技術協会，2012.11
- 5) 建設省：総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性の開発報告書，1989
- 6) 豊福 俊泰，吉岡 博幸，用害 比呂之：コンクリート補修材の品質特性ーコンクリート塗装材・断面修復材・鉄筋防錆材ー，日本道路公団試験所報告，Vol.25，p.73-86，1988
- 7) 豊福 俊泰，吉岡 博幸，用害 比呂之，関根 信哉：コンクリート塗装材の品質試験，コンクリート工学，Vol.28，No.2，Feb.1990
- 8) 青山 實伸：北陸地方のコンクリート構造物の塩害に対する耐久性確保に関する研究，博士論文，1 月，2004 年
- 9) 吉田 敦，濱田 達也，本村 均：暴露試験と促進試験によるコンクリート塗装材の性能検討，日本道路公団試験所報告，Vol.37，p.85-95，2000
- 10) 竈本 武弘，野島 昭二，藤田 庫雄：コンクリート表面被覆材の耐久性向上に関する検討，コンクリート工学，Vol.47，No.2，2009.2
- 11) 竈本 武弘，野島 昭二：コンクリート表面被覆材耐久性向上に向けた基準改訂，NEXCO 技術情報，第 7 号，2009.3
- 12) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説，1984 年
- 13) 東日本高速道路㈱・中日本高速道路㈱・西日本高速道路㈱：構造物施工管理要領，2008 年 7 月
- 14) 阪神高速道路㈱：コンクリート構造物表面保護要領（案），発行 2007 年
- 15) （社）日本鉄道施設協会：東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物 維持管理標準，2009 年 5 月
- 16) 西日本旅客鉄道㈱：コンクリート構造物補修の手引き〔第五版〕，2007 年
- 17) 樺山好幸，吉田幸信，吉田敦，山田卓司，宮川豊章：塗装系防食材の追跡調査に基づく耐久性評価と付着性能評価手法の提案，コンクリート工学論文集，Vol.14，No.3，pp.11-22，2003.3
- 18) 吉田 幸信，大西 邦晃，樺山 好幸，山田 卓司：コンクリート構造物の塗装系防食材の追跡調査に基づく評価，第 2 回 コンクリート構造物の補修補強アップグレードシンポジ

ウム論文報告集第2巻, pp.353-360, 2002.10

- 19) 安藤 幹也, 藤原 俊明, 山本 雅貴, 山田 卓司: コンクリート構造物の塗装系防食材の追跡調査報告, 第5回 コンクリート構造物の補修補強アップグレードシンポジウム論文報告集第5巻, pp.399-404, 2005.10
- 20) 野村 倫一, 山田 卓司, 石橋 孝一: 再アルカリ化工法適用後のコンクリートに対する塗膜の適応性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, 2003
- 21) 野村 倫一, 山田 卓司, 荒木 弘祐: 再アルカリ化後に施工した表面被覆工法の経年調査結果, 土木学会次学術講演会, Vol.66, 2011
- 22) 渡辺 佳彦, 荒巻 智, 松田 好史, 山田 卓司, 宮川 豊章: 山陽新幹線 RC 高架橋に適用する表面被覆工法の評価方法について, 材料, Vol.58, No.8, pp691-696, 2009.8
- 23) 宮下 剛, 元売 正美, 椎名 貴快, 荒木 昭俊, 岸 利治: 各種表面被覆材の長期内陸・海洋暴露による耐久性能, 土木学会年次学術講演会, Vol.67, pp.251-252, 2012.9
- 24) 山田 卓司, 佃 洋一, 勝井 要, 渡辺 佳彦, 宮川 豊章: 付着性能による表面被覆工法の耐久性評価手法について, 材料, Vol.60, No.8, pp715-720, 2011.8
- 25) 山本 貴士, 宮川 豊章: 表面保護工を中心としたコンクリート構造物のアップグレード技術の現状と将来展望ーコンクリート構造物のアップグレード技術総論ー, 材料, Vol.60, No.11, pp1049-1055, 2011.11
- 26) 国枝 稔, 城田 常雄, 堀井 久一, 山本 高広, 得能 敏巳: 表面保護工を中心としたコンクリート構造物のアップグレード技術の現状と将来展望ー表面保護工を中心とする材料・技術の変遷ー, 材料, Vol.60, No.12, pp1149-1155, 2011.12
- 27) 濱田 秀則, 野村 倫一, 新名 勉, 渡辺 博志, 寺田 典生: 表面保護工を中心としたコンクリート構造物のアップグレード技術の現状と将来展望ー適用事例ー, 材料, Vol.61, No.1, pp89-95, 2012.1
- 28) 山田 卓司, 江口 和雄, 濱田 秀則, 宮川 豊章: 表面保護工を中心としたコンクリート構造物のアップグレード技術の現状と将来展望ー表面保護工を対象とした各種試験方法と今後の課題と将来展望ー, 材料, Vol.61, No.2, pp203-209, 2012.2
- 29) 山田 卓司, 佃 洋一, 山本 貴士, 国枝 稔, 宮川 豊章: 表面被覆工法の付着特性に着目した耐久性評価方法に関する研究, 材料, Vol.61, No.10, pp.715-720, 2012.10

第3章 表面被覆工法の性能把握に関する試験方法の検討

3.1 はじめに

コンクリート構造物の補修および予防保全を目的に，施工される表面被覆工法を評価する手法は，要求される性能を評価できるように試験項目が設定されている．表面被覆工法に用いられる表面被覆材の性能評価項目には，耐候性，遮断性，付着性，ひび割れ追従性，耐荷重性等がある．実構造物に施された表面被覆材は，常に屋外の厳しい環境に曝される状態にあるため，耐候性が重要なポイントとなる．耐候性を評価するには，長期間自然環境に曝すことで耐久性を評価する屋外暴露耐候性試験，また，キセノンアークランプ式やサンシャインカーボンアーク式に代表される促進耐候試験機を用い，自然環境を加速させた状態での塗膜性能を評価する促進耐候性試験がある．写真 3.1.1 にキセノンアーク放電によって発光するアークランプを用いたキセノンアークランプ式促進耐候試験機（以下「キセノンアークランプ式」とする．），写真 3.1.2 にキセノン照射ランプ，写真 3.1.3 に芯材にセリウム化合物を含有し，表面に銅等の金属被覆を施したカーボンをアーク放電させるサンシャインカーボンアーク式促進耐候性試験機（以下「サンシャインカーボンアーク灯式」とする．），写真 3.1.4 にカーボン設置状況の一例を示す．なお，各試験機の詳細は第5章 5.3.1 項に記す．なお，鋼構造物を対象にした塗装系については，耐候性以外に防食性についての評価を，複合サイクル試験機や塩水噴霧試験機等を用いて行う．

屋外暴露耐候性・促進耐候性試験の何れも，膨れや割れ等，塗膜表面を目視で評価する外観評価であるが，数値管理できる項目としては光沢保持率，変色，退色，白亜化度があり，主に上塗り塗膜について，劣化度合いを総合的に評価する評価項目である．



写真 3.1.1 キセノンアーク灯式耐候試験機

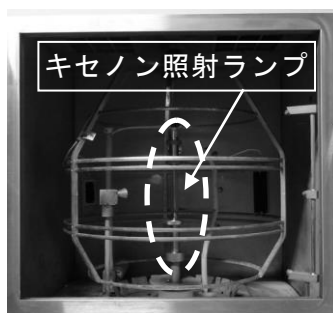


写真 3.1.2 キセノン照射ランプ



写真 3.1.3 サンシャインカーボンアーク式促進耐候試験機



写真 3.1.4 サンシャインカーボン

構造物中の鉄筋腐食を防御するには、外部からの有害物質の侵入を防ぐ性能を見極める必要がある。その遮断性を評価する項目として、塩化物イオンの透過阻止度合いを評価する遮塩性や、酸素の透過阻止度合いを評価する酸素遮断性および水の浸透阻止度合いを評価する項目として水遮断性がある。

一方、表面被覆工法により補修を実施した構造物内部には、場合によっては多くの水が蓄積されている。この蓄積された水分をある程度放出する性能も必要であり、その性能を水蒸気透過性で評価している。

表面被覆材の耐久性を評価する重要な項目として、被塗物との付着性を評価する単軸引張による付着強度や、コンクリートのひび割れ部位から外的劣化要因の侵入を防ぐため、コンクリートのひび割れに対する追従性を評価するひび割れ追従性がある。また最近では、第三者被害に対する対策として、耐荷重性を把握するため、はく落防止を目的にした押抜き試験も盛んに実施されている。なお、これらの試験項目は、名称および手法の異なるものもあるが、土木学会規準である JSCE-K シリーズや、各種団体規格に取り入れられており、四半世紀以上経過した現在も、一般的な試験方法として採用され、定期的な見直しもなされている。

3.2 表面保護工に求められる要求性能

コンクリート構造物に表面保護工を適用する場合、対象構造物が今後必要とする要求性能をカバーできる表面保護工を選定することが重要である。以下に、劣化対策として用いる表面保護工に対する要求性能として、コンクリート構造物の主要な劣化機構とそれらによる劣化対策として用いる表面保護工に対する要求性能として必要なものを、「**表面保護工法設計施工指針(案)**」¹⁾を基に筆者の知見を加えたものを表 3.2.1 に示す。また、表面保護工に用いる材料の性能を確認するのに必要な要求性能およびその評価項目の一例を以下に示す。

- ① 二酸化炭素遮断性（中性化阻止性）：二酸化炭素透過量，中性化深さ，中性化速度係数
- ② 付着性（付着強度）：躯体コンクリートとの接着性
- ③ 塩化物イオン遮断性（遮塩性）：塩化物イオン透過量，塩化物イオン拡散係数
- ④ 酸素遮断性：酸素透過量，酸素拡散係数
- ⑤ 凍結融解抵抗性：
塗膜の外観評価（膨れ，割れ，はがれ，変色等），コンクリートの相対弾性係数，質量減少率，躯体コンクリートとの接着性
- ⑥ 耐薬品性（耐酸性[硫酸等]，耐アルカリ性等）：
塗膜の外観評価（膨れ，割れ，はがれ，変色等），化学物質透過量，硫酸透過量，硫化イオンの分布状態，重量変化
- ⑦ 防水性（遮水性）：透水量
- ⑧ 水蒸気透過性（透湿性）：水蒸気透過量
- ⑨ ひび割れ追従性（柔軟性）：伸び性能，疲労特性
- ⑩ はく落抵抗性：強度特性，押し抜き荷重，伸び性能
- ⑪ 耐候性：屋外暴露耐候性試験後の塗膜の外観評価（膨れ，割れ，はがれ等），変色（色差），光沢保持率，白亜化度
- ⑫ 促進耐候性：促進耐候性試験後の塗膜の外観評価（膨れ，割れ，はがれ等），変色（色

差), 光沢保持率, 白亜化度

なお, 表 3.2.1 に挙げた評価項目は, 表面保護工に適用される材料自身, すなわち単膜の場合および塗装系としての複層の場合や, 表面保護工を適用したコンクリートの場合などを考慮に入れる必要がある。また, 付着性およびひび割れ追従性は, どの劣化機構にも求められる重要な基本性能のため, 「主として必要な要求性能」の位置づけとしている。

表 3.2.1 劣化対策として用いる表面保護工に対する主な要求性能

劣化機構 表面保護工 に対する要求性能	中性化	塩害	凍害	化学的侵食	アルカリ 骨材反応
付着性 (付着強度)	◎	◎	◎	◎	◎
ひび割れ追従性 (柔軟性)	◎	◎	◎	◎	◎
二酸化炭素遮断性 (中性化阻止性)	◎	○	△	△	○
塩化物イオン遮断性 (遮塩性)	○	◎	○	△	○
酸素遮断性	○	○	—	△	○
凍結融解抵抗性	—	—	◎	—	—
耐薬品性(耐酸性[硫酸等], 耐アルカリ性)	—	—	—	◎	—
防水性 (遮水性)	○	○	◎	○	◎
水蒸気透過性 (透湿性)	△	△	—	—	◎
耐候性	◎	◎	○	—	◎
促進耐候性	◎	◎	○	—	◎
はく落抵抗性	△	△	△	△	△

◎：主として必要な要求性能，○：副次的に必要な要求性能，△：場合により必要な要求性能

コンクリート構造物の補修を表面被覆工法で行う場合, その劣化対策は中性化をはじめ様々である。劣化対策ごとに表面被覆工法に要求される性能とその評価項目例を, 「表面保護工法設計施工指針(案)」¹⁾を基に表 3.2.2~表 3.2.10 に示す。

表 3.2.2 中性化対策に対する表面被覆工法の要求性能および評価項目

要求性能		評価項目	期待される効果
中性化による劣化を抑制・防止する性能	二酸化炭素遮断性	中性化深さ, 中性化速度係数	CO ₂ のコンクリート中への拡散阻止
	酸素遮断性	酸素透過量	酸素のコンクリート中への透過阻止
	塩化物イオン遮断性	塩化物イオンの浸透深さ, 塩化物イオン透過量	塩化物イオンのコンクリート中への透過阻止
	透湿性	透湿度	コンクリート中の水分の放散 (撥水性)
	遮水性	透水量	水分の浸入阻止
	ひび割れ追従性	塗膜の伸び量	ひび割れ部からの水分, CO ₂ の浸入, 透過阻止
耐久性能	耐候性	光沢変化, 割れ, はがれ, 膨れ, 白亜化	紫外線劣化に対する耐久性
	耐アルカリ性	割れ, はがれ, 膨れ, 軟化, 溶出	コンクリート自体のアルカリに対する抵抗性
	付着性	付着強度	下地との一体化による耐久性性能の持続

表 3.2.3 塩害対策に対する表面被覆工法の要求性能および評価項目

要求性能		評価項目	期待される効果
塩分浸透による劣化を抑制・防止する性能	塩化物イオン遮断性	塩化物イオンの浸透深さ，塩化物イオン透過量	塩化物イオンのコンクリート中への透過阻止
	酸素遮断性	酸素透過量	酸素のコンクリート中への透過阻止
	透湿性	透湿度	コンクリート中の水分の放散（撥水性）
	遮水性	透水量	水分の浸入阻止
	ひび割れ追従性	塗膜の伸び量	ひび割れ部からの劣化因子浸入遮断
	ひび割れ拘束性	引張強度（シート工法の併用）	ひび割れ部を力学的に拘束
耐久性能	耐候性	光沢変化，割れ，はがれ，膨れ，白亜化	紫外線劣化に対する耐久性
	耐アルカリ性	割れ，はがれ，膨れ，軟化，溶出	コンクリート自体のアルカリに対する抵抗性
	付着性	付着強度	下地との一体化による耐久性能の持続

表 3.2.4 凍害対策に対する表面被覆工法の要求性能および評価項目

要求性能		評価項目	期待される効果
凍結融解による劣化を抑制・防止する性能	遮水性	透水量	水分の浸入阻止
	塩化物イオン遮断性	塩化物イオンの浸透深さ，塩化物イオン透過量	塩化物イオンのコンクリート中への透過阻止
	ひび割れ追従性	塗膜の伸び量	ひび割れ部からの劣化因子浸入遮断
耐久性能	耐候性	光沢変化，割れ，はがれ，膨れ，白亜化	紫外線劣化に対する耐久性
	耐アルカリ性	割れ，はがれ，膨れ，軟化，溶出	コンクリート自体のアルカリに対する抵抗性
	凍結融解性	温度変化による疲労耐久性，温度変化抵抗性（温冷繰り返し）	温度変化繰り返し作用による耐久性
	付着性	付着強度	下地との一体化による耐久性能の持続

表 3.2.5 化学的侵食対策に対する表面被覆工法の要求性能および評価項目

要求性能		評価項目	期待される効果
化学的侵食による劣化を抑制・防止する性能	遮水性	透水量	水分の浸入阻止
	二酸化炭素遮断性	中性化深さ，中性化速度係数	CO ₂ のコンクリート中への拡散阻止
	酸素遮断性	酸素透過量	酸素のコンクリート中への透過阻止
	塩化物イオン遮断性	塩化物イオンの浸透深さ，塩化物イオン透過量	塩化物イオンのコンクリート中への透過阻止
	透湿性	透湿度	コンクリート中の水分の放散（撥水性）
	硫黄の浸透阻止性	硫黄の浸透深さ	硫黄の浸入阻止
	ひび割れ追従性	塗膜の伸び量	ひび割れ部からの劣化因子浸入遮断
耐久性能	耐候性	光沢変化，割れ，はがれ，膨れ，白亜化	紫外線劣化に対する耐久性
	耐薬品性	耐アルカリ性	コンクリート自体のアルカリに対する抵抗性
		耐酸性	高濃度の硫酸に対する抵抗性（下水道施設）
	付着性	付着強度	下地との一体化による耐久性能の持続

表 3.2.6 アルカリ骨材反応対策に対する表面被覆工法の要求性能および評価項目

要求性能		評価項目	期待される効果
アルカリ骨材反応による劣化を抑制・防止する性能	遮水性	透水量	水分の浸入阻止
	透湿性	透湿度	コンクリート中の水分の放散（撥水性）
	ひび割れ追従性	塗膜の伸び量	膨張圧等によるひび割れ部からの劣化因子浸入遮断
	塩化物イオン遮断性	塩化物イオンの浸透深さ，塩化物イオン透過量	塩化物イオンのコンクリート中への透過阻止
	酸素遮断性	酸素透過量	酸素のコンクリート中への透過阻止
	ひび割れ拘束性	引張強度（シート工法の併用）	ひび割れ部を力学的に拘束
耐久性能	耐候性	光沢変化，割れ，はがれ，膨れ，白亜化	紫外線劣化に対する耐久性
	耐アルカリ性	割れ，はがれ，膨れ，軟化，溶出	コンクリート自体のアルカリに対する抵抗性
	付着性	付着強度	下地との一体化による耐久性能の持続

表 3.2.7 景観・美観（変退色・防汚）対策に対する表面被覆工法の要求性能および評価項目

要求性能		評価項目	期待される効果
景観・美観に対する劣化を抑制・防止する性能	防汚性	明度差，色差，汚れ除去性	排気ガス等の汚染物質の付着に対する抵抗性
	二酸化炭素遮断性	中性化深さ，中性化速度係数	CO ₂ のコンクリート中への拡散阻止
	ひび割れ追従性	塗膜の伸び量	ひび割れの発生防止
耐久性能	耐候性	光沢変化，割れ，はがれ，膨れ，白亜化	紫外線劣化に対する耐久性
	耐アルカリ性	割れ，はがれ，膨れ，軟化，溶出	コンクリート自体のアルカリに対する抵抗性
	付着性	付着強度	下地との一体化による耐久性能の持続

表 3.2.8 はく落防止対策に対する表面被覆工法の要求性能および評価項目

要求性能		評価項目	期待される効果
はく落を劣化を抑制・防止する性能	はく落防止性	押し抜き強度	浮コンクリートの重量を支える抵抗性
	ひび割れ追従性	繊維シートの伸び量	浮コンクリートの膨張押出しに対する変形追従性
耐久性能	耐候性	光沢変化，割れ，はがれ，膨れ，白亜化	紫外線劣化に対する耐久性
	耐アルカリ性	割れ，はがれ，膨れ，軟化，溶出	コンクリート自体のアルカリに対する抵抗性
	付着性	付着強度	下地との一体化による耐久性能の持続

表 3.2.9 防水性対策に対する表面被覆工法の要求性能および評価項目

要求性能		評価項目	期待される効果
防水性を確保する性能	遮水性（防水性）	透水量	水分の浸入阻止
	ひび割れ追従性	塗膜の伸び量	許容ひび割れ幅に対する追従性
耐久性能	耐候性	光沢変化，割れ，はがれ，膨れ，白亜化	紫外線劣化に対する耐久性
	耐アルカリ性	割れ，はがれ，膨れ，軟化，溶出，変色	コンクリート自体のアルカリに対する抵抗性
	耐薬品性		各種化学物質に対する抵抗性
	付着性	付着強度	下地との一体化による耐久性能の持続

表 3.2.10 乾燥収縮・温度・疲労によるひび割れ対策に対する
表面被覆工法の要求性能および評価項目

要求性能		評価項目	期待される効果
乾燥収縮・温度・疲労によるひび割れを抑制・防止する性能	ひび割れ追従性	塗膜の伸び量	力学的な荷重の変動に対する追従性
耐久性能	耐候性	光沢変化, 割れ, はがれ, 膨れ, 白亜化	紫外線劣化に対する耐久性
	耐アルカリ性	割れ, はがれ, 膨れ, 軟化, 溶出	コンクリート自体のアルカリに対する抵抗性
	付着性	付着強度	下地との一体化による耐久性能の持続

3.3 表面被覆工法

第1章でも述べたように表面被覆工法は、高分子材料や繊維シートと接着剤が一体となった FRP のような材料から成る表面被覆材を用いてコンクリート構造物の劣化を引き起こす因子である塩化物イオン、二酸化炭素、酸素等の侵入を防止、抑制するために適用されている。表面被覆工法は、対象物に塗料等を直接塗布することで、外部からの影響を受けにくくすることができる工法であり、コンクリート構造物の性能低下を抑えるのに有効な手段である。

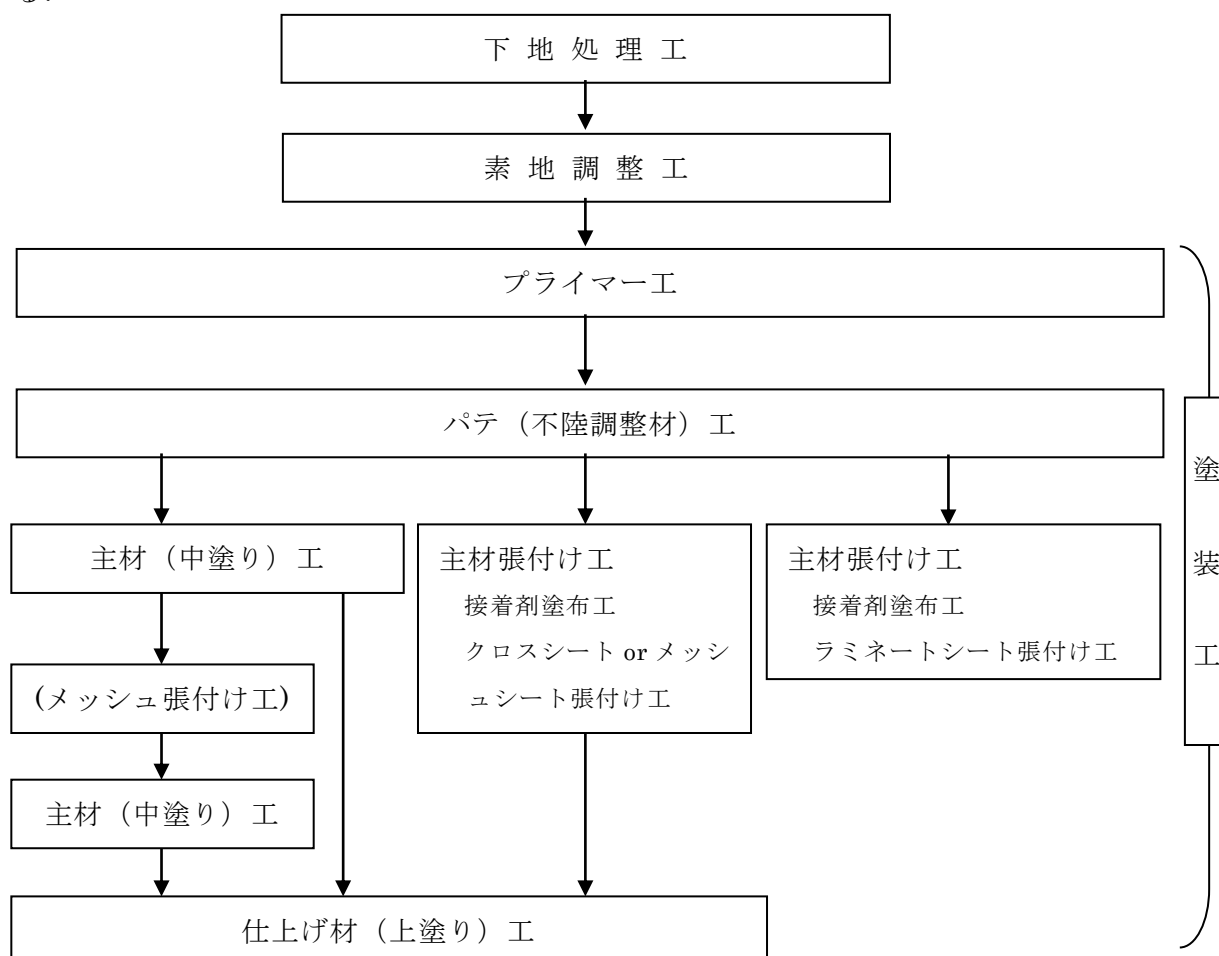


図 3.3.1 表面被覆工法施工の流れ

断面修復工法を併用しない場合の表面被覆工法施工の流れを図 3.3.1 に示すとともに、3つの工程および各塗装工程について述べる。

(1) 下地処理工：

対象物に施工される被膜の膜厚を均一にし、仕上がりや外観を良好にするために行う、ひび割れ注入や不陸調整などの物理的な処理工程。

(2) 素地調整工：

レイトンス、脆弱層あるいは離型剤をブラスト処理やディスクサンダーなどの電動工具や手工具で除去して、被膜材料とコンクリートの接着性を確保するために行う処理工程。

(3) 塗装工：

目的に応じた性能を発揮させるためには一層の被膜で満足させることは非常に困難である場合が多い。通常はプライマー、パテ（不陸調整材）、主材（中塗り）、仕上げ材（上塗り）で構成される。なお、表面被覆工法に期待される主な効果は、劣化因子の侵入抑制であり、厚膜になる程その効果は大きいと考えられる。また、主材（中塗り）や仕上げ材（上塗り）に柔軟型の材料を適用することでひび割れ追従性が付与される。

以下に塗装工で適用される各塗装工程の特徴について述べる。

① プライマー：

下地コンクリートの表層を強化および被覆材との一体性を確実にするための性能が要求され、主に低粘度の被覆材が使用される。また、コンクリートのアルカリ性に耐えられる材料を使用することも重要であり、塗装系の良し悪しを左右する。

② パテ（不陸調整材）：

素地調整後にコンクリート表面に生じた小さな穴を埋めて平滑さを向上させるために用いる。ペースト状の有機系被覆材あるいはポリマーセメント系が用いられる。この不陸調整材が樹脂リッチな場合、不陸調整材表面が平滑な状態となり、アンカー効果不足や塗膜の硬度差により、主材層との層間はく離を起こす場合もある。

③ 主材（中塗り）：

外部環境からの劣化因子の侵入を阻止する性能とともに、RC コンクリートの場合ではひび割れ幅の変動に対する追従性能も要求される。比較的厚膜で、場合によっては柔軟性に富む塗料が用いられる。躯体の補修目的を達成させるのに要求される性能を、最大限に発揮するための被覆システムの主たる材料である。

④ 仕上げ材（上塗り）：

目的の性能を発揮するために重要な役割を果たす主材を、外部環境から守るために用いられる材料である。直接外部環境に接する仕上げ材は、日射（特に紫外線）や大気等の気象作用により劣化しにくいことが必要であり、耐候性に優れた塗料が用いられる。紫外線劣化は原子間の結合エネルギーに深く関係しており、大きいほど紫外線により切断されにくく、塗膜劣化が起こりにくいとされている。例えばふっ素樹脂の場合 FC-CH 間結合エネルギー：490kJ/mol、アクリル樹脂の場合 HC-CH 間結合エネルギー：289kJ/mol となり、ふっ素樹脂の方が高耐候である。近年では高耐候性塗料としてふっ素樹脂系の仕上げ材が多用されている。

以上、表面被覆工法に用いられる表面被覆材は、劣化因子の侵入を抑制するため、図 3.3.1

に示す施工の流れによって適用される。また、劣化因子の侵入を抑制する性能だけでなく、耐候性、コンクリートとの付着性、耐アルカリ性等が要求されている。繰り返し荷重の作用、アルカリ骨材反応や温度の日変動（温度差）によってコンクリートのひび割れ幅が変動する場合は、劣化因子の侵入を抑制する効果を維持するため、ひび割れ追従性も重要な要求性能である。以下に有機系被覆工法および無機系被覆工法別にその適用効果について述べる。

3.3.1 有機系被覆工法¹⁾

有機系被覆工法に用いられる有機系被覆材の特徴は、ひび割れ追従性に対して機能を発揮させる柔軟型の樹脂系を主材（中塗り）や仕上げ材（上塗り）に用いることができることである。例えば、柔軟型エポキシ樹脂、柔軟型ウレタン樹脂、ゴム系材料が該当する。なお、表面被覆工法に期待される主な効果は、劣化因子の侵入抑制であり、厚膜になるほど抑制効果は大きく、主材や仕上げ材に柔軟性を持たせることでひび割れ追従性が付与される。ただ、特に柔軟性を付与していない塗膜であっても、その有機系材料自身がコンクリートとの付着性が良好でない場合、有機系材料のもつ伸び性能によってひび割れ追従性が確保されているかのように見える場合があるので注意を要する。有機系被覆工法に期待される性能とその適用効果について、(社)土木学会より2005年に制定された「表面保護工法設計施工指針(案)」¹⁾に基づきまとめたものを表3.3.1.1に示す。

表 3.3.1.1 有機系被覆工法に期待される性能と適用効果

	塗装工法				シート工法 ^{注3)}						
	主材(中塗り材)の種類				塗布接着形シート工法						張付け接着形シート工法
	標準形	厚膜形	柔軟形	柔軟厚膜形							
樹脂およびシートの種類 ^{注1)}	エポキシ	エポキシ、 アクリル、 ビニルエステル、 ポリエステル、 アクロイル	エポキシ、 ポリウレタン、 ふっ素	エポキシ、 ポリウレタン、 アクリルゴム、 クロロプレングム、 ポリブタジエンゴム、 ポリウレア	ガラス繊維シート(1層/2層)/エポキシ	ビニロン繊維シート/ エポキシ、 アクリル、 クロロプレングム	アラミド繊維シート/ エポキシ	カーボン繊維シート/ エポキシ、 アクリル	ガラスマット ^{注4)} (1層/2層)/エポキシ、 ビニルエステル、 ポリエステル	ラミネートシート/ エポキシ	
膜厚(μm)	100未満	100以上	100未満	100以上	500/1000	500	700	積層数により変化	1000～2000	1000	
期待性能 ^{注2)}											
中性化抑制	○	○	○	○	*	*	*	*	*	*	
付着性	○	○	○	○	○	*	*	*	*	*	
塩化物イオンの侵入抑制	○	○	○	○	*	*	*	*	*	*	
凍結融解抵抗性	△	△	△	○	*	*	*	*	*	*	
化学的侵食抑制	△	○	△	○	○	-	*	○	○	*	
アルカリ骨材反応抑制	△	△	△	△	*	*	*	*	*	*	
ひび割れ追従性	△	△	○	○	*	*	*	*	*	*	
美観・景観に関する性能	○	○	○	○	*	*	*	*	*	*	
はく落抵抗性	-	-	-	-	○	○	○	○	*	○	

注 1)：市販の代表的な有機系被覆材を記載

注 2)：期待される主要な効果（○：適用対象，△：適用時検討必要，-：適用対象外）

注 3)：はく落防止を主目的とするが、下水道構造物の劣化防止にも適用可能（*印は、同様の樹脂系を用い、かつ膜厚が同じ場合は塗装工法と同様の適用効果を期待できる）

注 4)：ガラスマットについては、日本下水道事業団「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル（平成14年12月）」を参照。

また，塗装工程別による塗装工法用被覆材料の分類例を図 3.3.1.1 に，機能別による分類例を図 3.3.1.2 に示す．

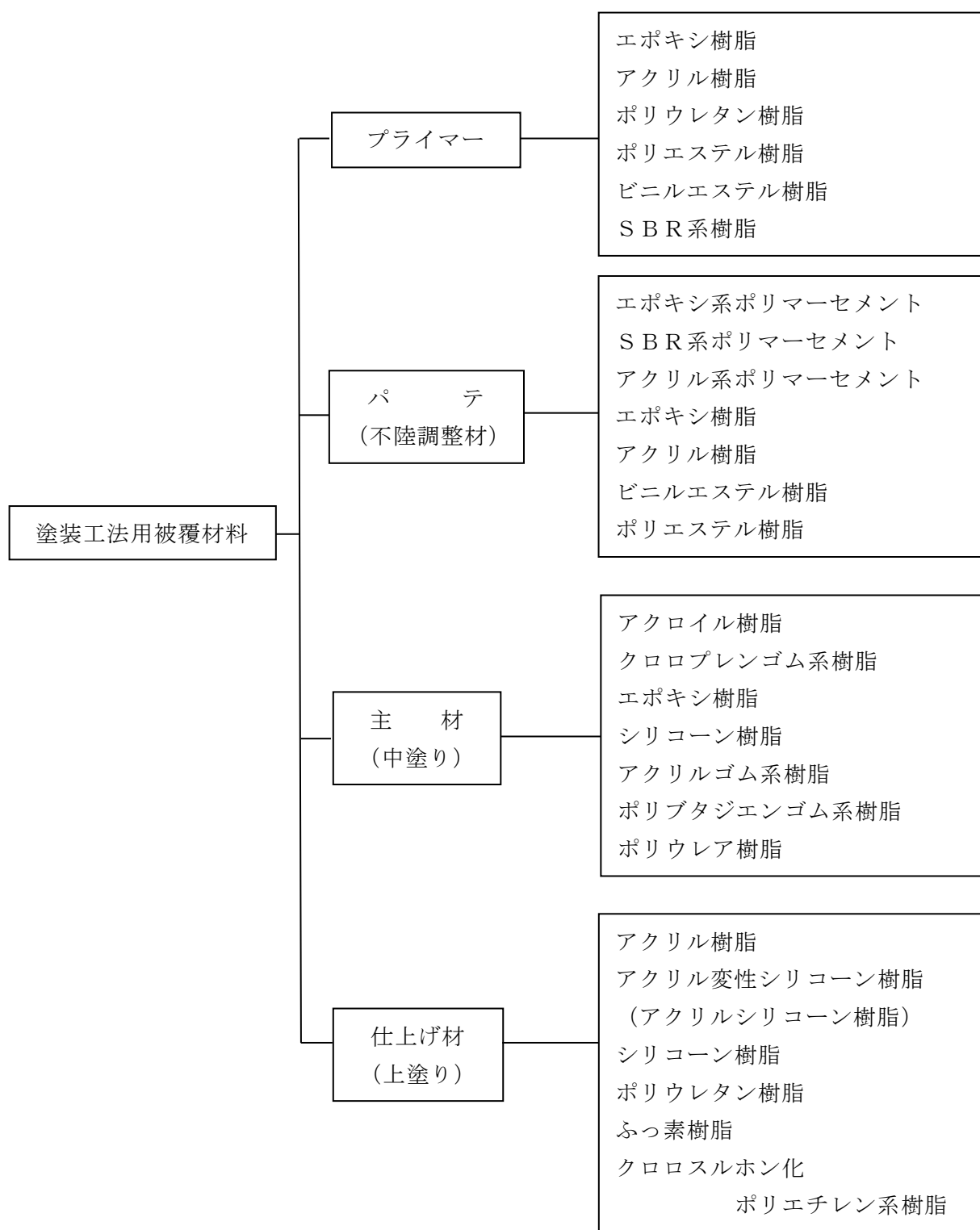


図 3.3.1.1 塗装工程別による塗装工法用被覆材料の分類

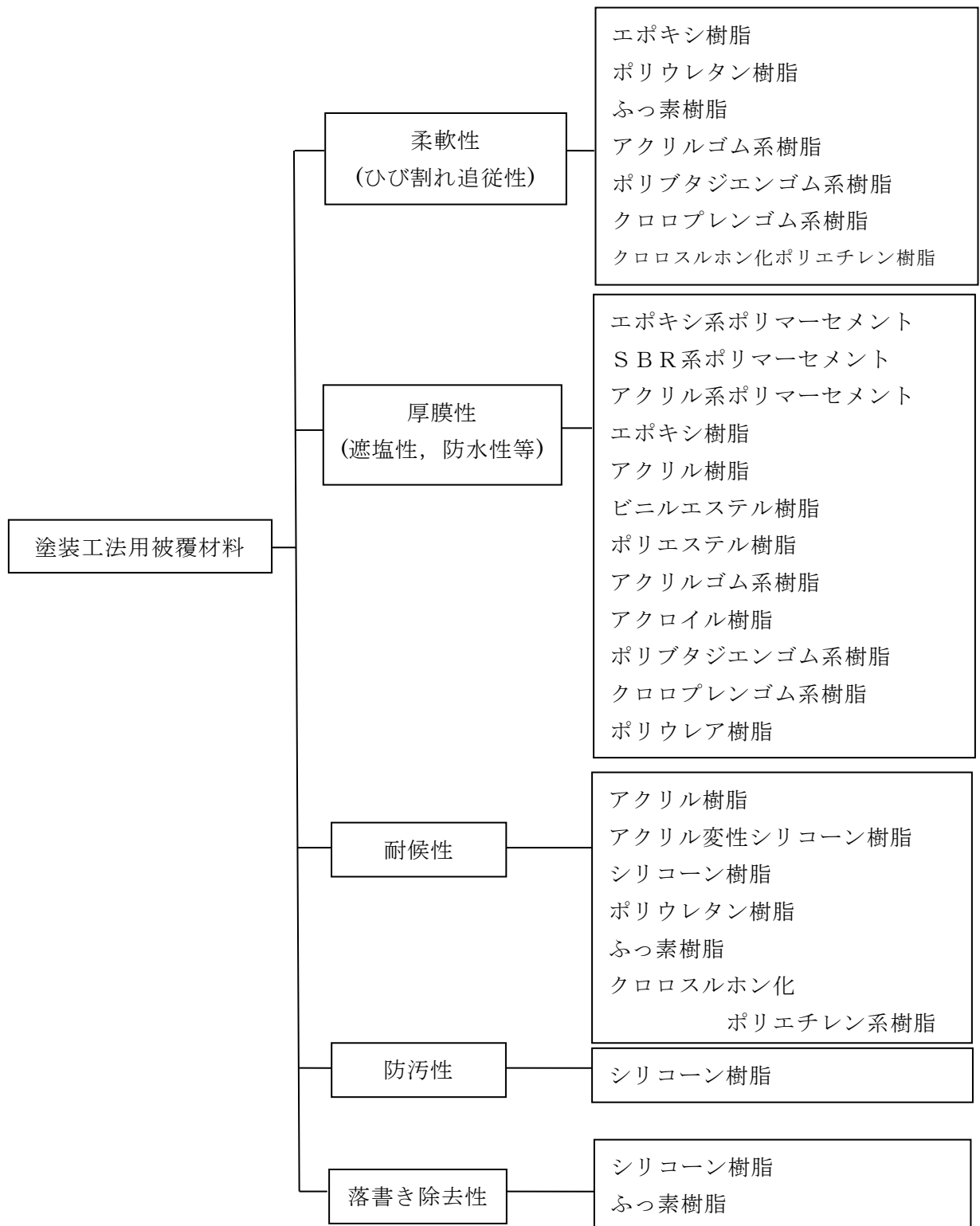


図 3.3.1.2 機能別による塗装工法用被覆材料の分類

有機系被覆工法に対する性能照査は，構造物に有機系被覆工法が施工された状態あるいは同等とみなされる施工状態で行うのが最も良好な方法であるが，実構造物での評価は破壊試

験となること、現場での性能確認が困難な照査項目があること等、現実には難しい。そこで、有機系被覆材あるいは被覆システムの品質が、所定の基準を満たすことで被覆システムの要求性能が確保できるとあらかじめ確認されている場合、その品質試験結果をもとに被覆工法の要求性能を照査できるとしている。有機系被覆工法の性能照査の考え方のまとめとして、有機系被覆材および被覆システムの評価項目の関係を、「表面保護工法設計施工指針(案)」¹⁾を基に筆者の知見を加えたものを表 3.3.1.2 に示す。

表 3.3.1.2 有機系被覆材および被覆システムの評価項目

要求性能	有機系被覆工法の適用対象となる構造物の劣化								
	中性化	塩 害	凍 害	化学的 侵 食	アルカリ骨 材反応	景 観 美 観	はく落	防水性	乾燥収 縮・温度 ひび割れ
耐候性	○	○	○	○(屋外)	○	○	○	○	○
耐アルカリ性	○	○	○	○	○	○	○	○	○
耐酸性	-	-	-	◎	-	-	-	○	-
耐薬品性	-	-	-	◎	-	-	-	○	-
付着性	○	○	○	○	○	○	◎	○	○
二酸化炭素阻止性	◎	○	△	△	○	-	-	-	-
防水性(遮水性)	○	◎	◎	◎	◎(防水系)	△	-	◎	-
水蒸気透過阻止性 (透湿性)	○	○	○	○	△	△	-	○	-
水蒸気透過性(透湿 性)	○	○	-	-	◎(撥水系)	-	-	○	-
酸素透過阻止性	○	◎	-	△	○	-	-	-	-
塩化物イオン透過阻 止性(遮塩性)	○	◎	◎	○	○	-	○	-	-
硫黄の浸透阻止性	-	-	-	◎	-	-	-	-	-
凍結融解抵抗性	-	-	◎	-	-	-	-	-	-
ひび割れ追従性	○	○	○	○	◎	-	◎	△	◎
ひび割れ拘束性	-	△	-	-	△	-	-	-	-
防汚性	-	-	-	-	-	◎	-	-	-
はく落防止性	△	△	△	△	△	-	◎	-	-

◎：劣化を抑制・防止する性能，○：基本的に要求される性能，△：必要に応じて要求される性能

3.3.2 無機系被覆工法¹⁾

無機系被覆工法は前項 3.3.1 有機系被覆工法同様、コンクリート構造物の劣化因子である二酸化炭素、塩化物イオン、水分、酸素等の侵入を抑制する効果の高い無機系被覆材料の特徴を活かし、コンクリート表面を厚さ 1～5mm 程度の単層（主材）または複層（主材および仕上げ材）によって構成される各種無機系材料で被覆する表面保護工法である。さらに、主材（中塗り）の中にメッシュを入れたはく落防止効果を有するメッシュ工法も適用されている。

使用される材料の多くは、一般に主材（中塗り）としてポリマーセメント系被覆材とポリシロキサン等を主成分とする無機質系被覆材に分かれる。無機系被覆材は、有機系被覆材に比べ、その特性から紫外線に対する抵抗や耐候性に優れていると同時に難燃性に優れている。また、単層で使用する場合、無機質系被覆材は無機質系であるため、有機系被覆材では悪条件とされる塗布面が湿潤状態であっても施工可能なものが多い。表面被覆工法としての性能を維持しつつ単層仕上げということもあり、工期短縮およびコストの低減を図ることが可能である。その反面、柔軟形でないものではひび割れ追従性に劣るものもある。

主材（中塗り）層に使用されるのはポリマーセメント系が主流で、アクリル系、SBR系、エポキシ系等があり、標準形と柔軟形に大別される。柔軟形はコンクリートの微細なひび割れに追従し劣化因子の侵入を抑制する。標準形はそのほとんどがひび割れ追従性を有しないため、コンクリート構造物の劣化状況がそのまま現れることが多く、維持管理の面から考えると劣化状況の進行度合いを確認するのに適している。ただ、発生した欠陥（例えば 割れ、はがれ等）を長期に亘って放置した場合、環境因子がコンクリート躯体内部に入り込み、被害が拡大する恐れがあるため、維持管理には注意を要する。なお、複層による工法は、仕上げ材（上塗り）に有機系被覆材を使用することで、主材（中塗り）層の保護や美観の向上を図っている。無機系被覆工法に期待される性能とその適用効果について、（社）土木学会より 2005 年に制定された「表面保護工法設計施工指針(案)」¹⁾に基づきまとめたものを表 3.3.2.1 に示す。

表 3.3.2.1 無機系被覆工法に期待される性能と適用効果

期待性能 ^{注1)}	単層による塗装工法		複層による塗装工法		メッシュ工法 ^{注4)}
	標準形	柔軟形	標準形	柔軟形	
中性化抑制	○	○	○	○	*
付着性	○	○	○	○	*
塩化物イオンの侵入抑制	○	○	○	○	*
凍結融解抵抗性	○	○	○	○	*
化学的侵食抑制	△	-	△	△	*
アルカリ骨材反応抑制 ^{注2)}	△	-	△	△	*
ひび割れ追従性	○	△	○	△	*
美観・景観に関する性能	△	△	○	○	*
はく落抵抗性 ^{注3)}	-	-	-	-	○

注 1)：期待される主要な効果（○：適用対象，△：適用時検討必要，-：適用対象外）

注 2)：アルカリ骨材反応抑制は、標準的な遮水性により判定。

注 3)：はく落抵抗性は付着性を基本に判定。

注 4)：メッシュ工法の「*」については、単層および複層による塗布工法と併用して使用するため、その適用範囲は、使用する無機系被覆の各工法の適用範囲に準ずることを示す。

単層による塗布工法は、素地調整および主材（中塗り）工で構成され、下地の調整により下地処理工、プライマー工、パテ（不陸調整）工を行う。なお、主材（中塗り）工では同一の材料を複数回塗り重ねる場合もある。ポリマーセメント系に使用されるセメント混和用ポリマーは水性ポリマーディスペーション、再乳化形粉末樹脂の2種類に大別される。一般に、セメントモルタルはスチレンブタジエンゴム（SBR）系ラテックス、エチレン酢酸ビニル（EVA）系樹脂エマルジョン、ポリアクリル酸エステル（PAE）系樹脂エマルジョン、エポキシ樹脂系エマルジョン等が使用されている。表 3.3.2.1 と同様に「表面保護工法設計施工指針(案)」¹⁾に基づき、図 3.3.2.1 にセメント系混和用ポリマーの種類、図 3.3.2.2 に工程別による複層塗布工法の構成材料の分類を示す。また、表 3.3.2.2 に無機系被覆工法の適用分類を示す。

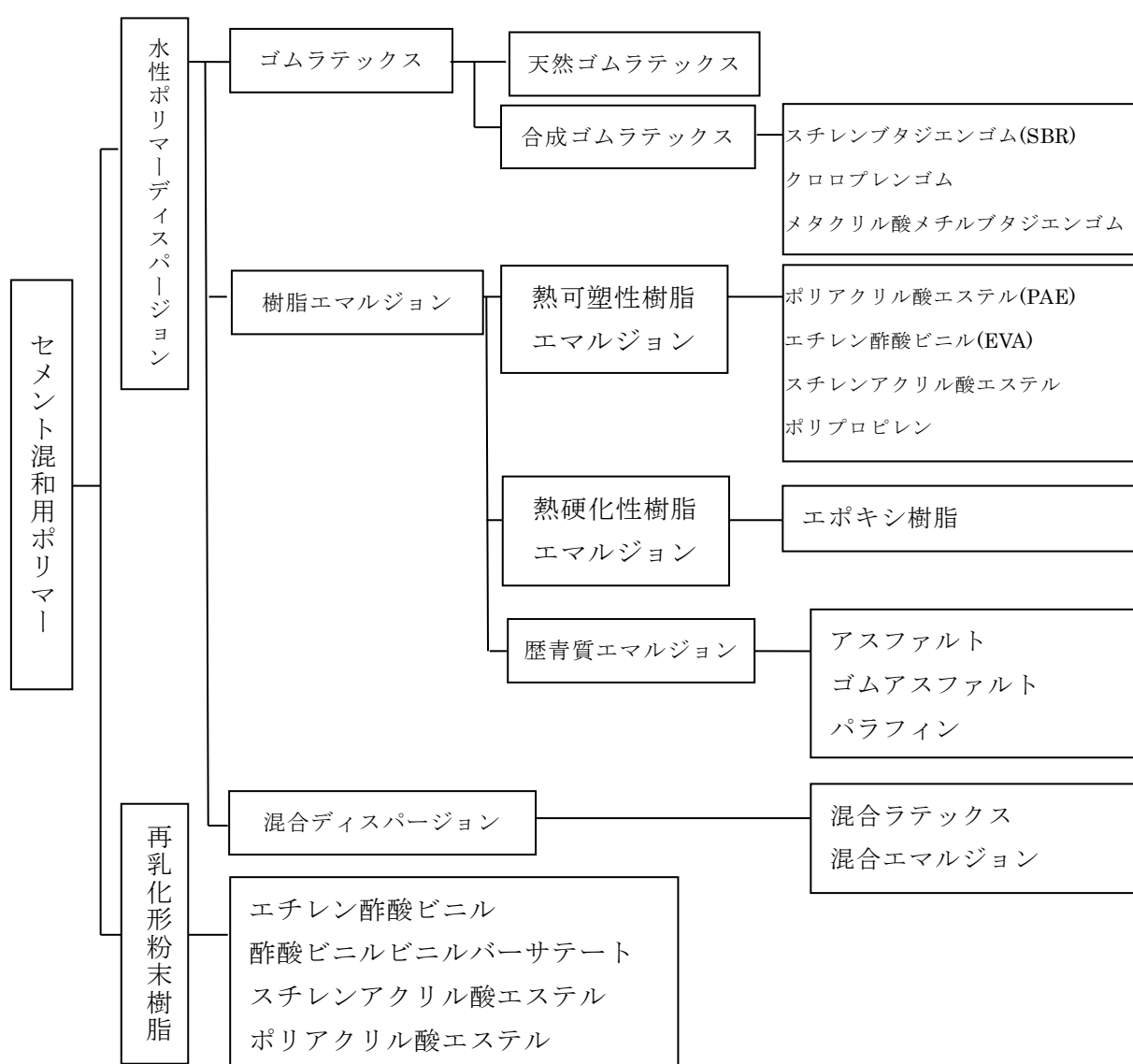


図 3.3.2.1 セメント系混和用ポリマーの種類

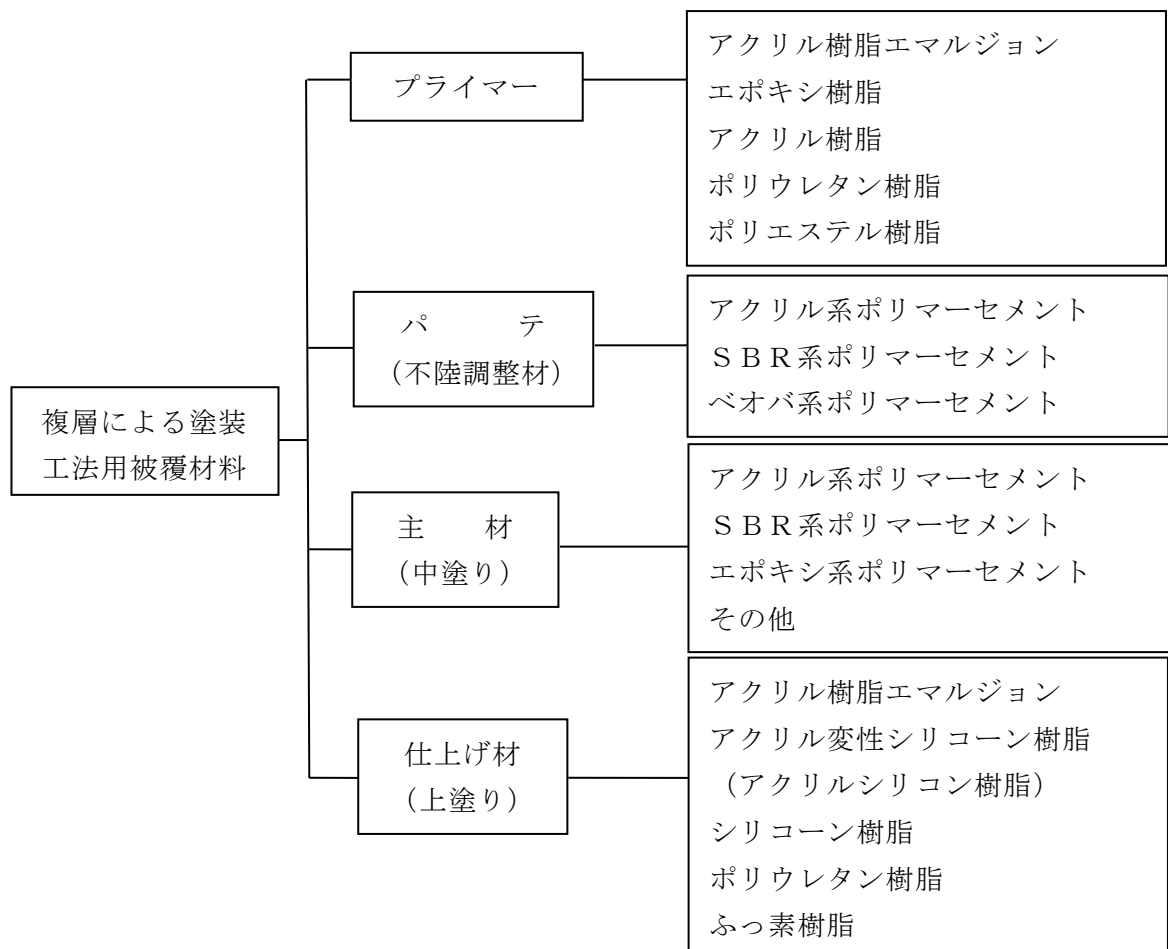


図 3.3.2.2 工程別による複層塗布工法の構成材料の分類

表 3.3.2.2 無機系被覆工法の適用分類

被覆材の分類		無機系被覆工法				
		単層による塗装工法		複層による塗装工法		メッシュ工法
		標準形	柔軟形	標準形	柔軟形	
要求性能	予防保全やひび割れなし	○	○	○	○	←
	ひび割れあり	△	○	△	○	←
付着性		○	○	○	○	←
塩化物イオンの侵入抑制	予防保全や潜伏期	○	○	○	○	←
	塩害環境や進展期以上	△	△	△	△	←
凍結融解抵抗性	凍結融解抑制	○	○	○	○	←
化学的侵食抑制		-	△	△	△	←
アルカリ骨材反応抑制	ひび割れの進行が停止	-	△	-	△	←
	ひび割れが進行中	-	-	-	-	←
美観・景観に関する性能		△	△	○	○	←
はく落防止		-	-	-	-	○

注) 期待される主要な効果 (○: 適用対象, △: 適用時検討必要, - : 適用対象外)

3.4 表面被覆工法の性能評価に関する試験方法の現状

現在、主としてコンクリートの補修および新設での予防保全を目的に適用される表面被覆工法について、用いられる表面被覆材の性能評価は重要であり、特にその耐久性を評価することは、コンクリート構造物を末永く維持するうえでも必須事項である。表面被覆工法の耐久性を評価する最も有効な試験方法は構造物が曝される実際の環境下で行う暴露試験である。しかし、個別の環境ごとに暴露試験を行うのは現実的ではないため、標準的と思われる環境下で統一手順による暴露試験を行うのが一般的である。暴露試験により、太陽からの光エネルギーである日射（特に紫外線）、水分（降雨や結露）、酸素、熱、塩分、場合によっては化学物質汚染（酸性雨等）、塵・雨・風による物理的摩耗等、様々な劣化因子の攻撃を受け塗膜劣化が進行するが、そのメカニズムは単純ではなく、複数の劣化因子による複合的なものであることが多い。また、表面被覆工法の劣化現象は、表層、層中、コンクリートとの界面を含む各種界面など様々な部位や場所で、それぞれに異なった劣化因子（単一もしくは複合）に基づいて進行する。その程度は用いられる表面被覆材の種類や組成によって大きく異なり、極めて複雑なメカニズムによるものとされている。したがって、表面被覆工法の耐久性を評価する場合には、暴露試験だけでなく、表面被覆材の物理特性や化学特性及びその変化を種々の手法で評価する試みが続けられ、表 3.3.1.1 や表 3.3.1.2 に例示した期待性能や要求性能の各項目が基準化されている。3.4 節では、これらの性能項目に影響する表面被覆工法に用いられる表面被覆材の重要な機能として、耐候性、遮断性、付着性およびひび割れ追従性を取り上げ、主な機関で適用されている試験方法の現状および問題点をまとめる。

3.4.1 耐候性

ここでは、塗料で一般的に呼ばれる「耐候性」について述べる。なお、耐候性とは、自然環境条件の影響を受け、時間の経過に伴って起こる材料の劣化に対する抵抗性であり、塗装された構造物を屋外で使用する場合の耐久性をいう。表面被覆工法に用いる表面被覆材の耐候性は屋外での暴露試験によって評価することが望ましいが、結果を得るまでに長期間を要すること、暴露環境によって結果が異なる場合があること等の短所もあり、評価結果を迅速に得るために劣化を加速させることを意図した促進耐候性試験が多用されている。促進耐候性試験は、塗膜劣化の主要劣化因子である「光」、「熱」、「水分」による負荷を人工的に増幅させて早期に劣化を促し、塗膜の長期耐久性を短期間で評価できるように開発されたものである。しかし、屋外での暴露試験との相関等、考慮すべき点が多々あるのも事実である。

種々の劣化因子のうち太陽光線の持つ光エネルギーは、仕上げ材である上塗り塗膜の耐候性を低下させる主要因子であり、特に紫外線は塗膜の劣化に大きく影響している。塗料に用いられている樹脂・顔料・添加剤等の有機物の分子構造を切断・分解するのは、地表に到達する 400nm 未満の波長をもつ紫外線領域の光である。この波長領域の光は 70~95kcal/mol のエネルギーを有しており、およそ有機化合物の結合エネルギーに匹敵するものである(表 3.4.1.1 参照)²⁾。したがって、この結合エネルギー以上のエネルギーをもった波長の太陽光のもとに曝されると有機化合物の結合が切断され、劣化することになる。

塗膜が通常の屋外環境で光（紫外線）の照射や降雨、結露などによって劣化していく場合、以下に示すような化学的なメカニズムに従って、高活性のラジカル（不対電子を持たない活

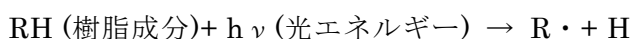
性で短寿命の化学種の総称) や過酸化物の生成を起点とする塗膜中の樹脂成分の化学的分解が連鎖的に進行していくものと考えられている。

表 3.4.1.1 主な原子間の結合構造と結合エネルギー

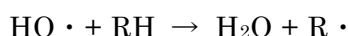
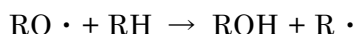
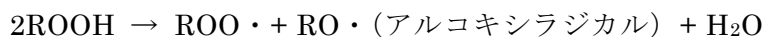
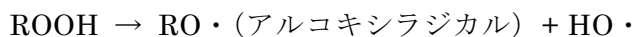
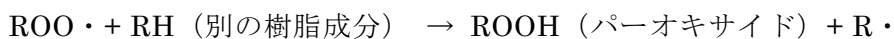
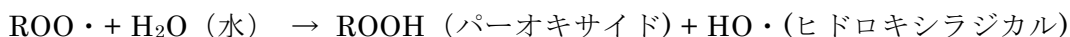
	波長 (nm)	エネルギー (kcal/mol)	結合構造(エネルギー)
紫外線	250	120	O-H(111)
		110	
		100	C-H(106)
	300	90	N-H(87)
		80	C-C(83) C-H(80)
	380		
可視光	400	70	C-N(70)
		60	
		50	
	700	40	
	800		
赤外線	1000	30	
		20	

下記の反応式は光エネルギーによって樹脂中に生成するラジカルの挙動を示すものであるが、開始反応で一旦ラジカル ($R\cdot$) が生成すると、＜成長反応＞での酸素と容易に反応し、パーオキシドラジカル ($ROO\cdot$) を生成する。このパーオキシドラジカル ($ROO\cdot$) は水の存在下でパーオキシド ($ROOH$) を生成。一方で別の樹脂成分との反応でパーオキシド ($ROOH$) とラジカル ($R\cdot$) を生成する。特にパーオキシドの開裂反応は、樹脂中のラジカル濃度を急速に増加させ、樹脂中の分子鎖切断反応に大きく寄与している。^{3), 4)}

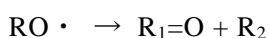
＜開始反応＞



＜成長反応＞



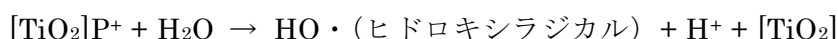
＜分子鎖切断反応＞



また、塗膜中で発生する光劣化には顔料に起因するものもあり、代表的なものとして酸化チタンによる光触媒作用が挙げられる。通常のエナメル塗膜にはチタン白(酸化チタン)が

配合されており，紫外線を吸収した酸化チタンが励起され+電荷の正孔と・電荷の電子を生成し，塗膜中の酸化チタン近傍の水が正孔によって酸化され，高活性のヒドロキシルラジカル（ $\text{HO}\cdot$ ）が発生．これが上述の光劣化と同様な樹脂の劣化反応を進行させることが知られている^{4), 5), 6), 7)}．酸化チタンによる光触媒作用の場合，顔料周辺部を中心に劣化が進行するという特徴的な劣化形態となる⁴⁾．

＜光触媒作用によるラジカル生成反応＞



塗膜の劣化は，塗膜を構成する成分によって劣化因子の影響の受け方が異なる²⁾．例えばふっ素樹脂やシリコン樹脂のように原子間の結合エネルギーの大きな樹脂で構成されている場合，長期間曝されていても塗膜中の結合は破壊されず，比較的性能を維持することが可能である．特に樹脂の主鎖となる結合が強い場合，分解は促進されにくく長期耐久性が期待できる．一方，アルキド樹脂や塩化ビニル樹脂のように原子間の結合エネルギーが弱い部分を持つ樹脂の場合，比較的早く劣化することになる．

しかし，表面被覆工法として用いられる塗料の場合，その多くは架橋剤による高分子化が図られている．緻密な網目構造を形成することで，ラジカルの攻撃による劣化を抑制し，水や酸素の相乗効果による加水分解から守る構造を形成することでより耐久性のある塗料となる．また，塗料中に使用される顔料についても耐久性に与える影響が大きく，有機顔料，無機顔料，金属顔料等，複数の顔料が使用されるが，顔料の組み合わせや塗膜を形成する樹脂と顔料の組み合わせ等が悪いと，耐久性の優れた樹脂を使用しても早期に劣化現象が現れる場合がある．使用する顔料の耐候性に差がある場合は，耐候性の悪い顔料が早期に劣化して耐候性の良好な顔料のみが残るため，塗膜が変色したように見える．例えば，ふっ素樹脂に耐候性の良好でないアゾ系赤顔料を使用すると塗膜表面に近い顔料から徐々に分解され消失する．さらに，光安定性の高い樹脂中に不安定な酸化チタン（ルチル型やアナターゼ型）を使用した場合には，白亜化が早期に進行し劣化傾向をたどる．すなわち，原子間の結合エネルギーが大きいふっ素樹脂であっても，使用する顔料によって耐候性が異なることとなる．

このように，表面被覆工法に用いられる表面被覆材の耐候性評価においては，暴露環境や結合エネルギーに加えて，被覆材を構成する塗膜成分についても吟味して考察する必要があるといえる．

実際の環境条件に比べて紫外線などの劣化因子を極端に強めた促進耐候性試験としては，(a) サンシャインカーボンアーク灯式（国際的にはオープンフレームカーボンアークランプ式耐候性試験と呼ばれている．），(b) キセノンアークランプ式の 2 種類が一般的である．いずれも，同一条件下での試験実施が可能であること，屋外での暴露試験である屋外暴露耐候性試験に比べて早く結果が得られること等の長所がある一方，単純化した試験条件としているため，屋外暴露耐候性試験との相関関係を把握することは必ずしも容易ではないとされている．すなわち，屋外暴露耐候性試験では各劣化因子の影響度合いが均一ではなく複雑なものであることに加え，表面被覆工法に用いられる樹脂や塗装系によっても劣化機構が異なることなどが影響しており，目的や用途に応じて今もさまざまな調査研究が繰り返されているところである．研究の一例として，一般社団法人 日本塗料工業会が実施した「各種塗料別に

評価項目ごとの耐候性試験に対する各種促進耐候性試験との相関性」の調査結果^{3), 8)}を表 3.4.1.2 (太陽光の紫外線 1 年間のエネルギー量 (298.4MJ/m²) を 1 とした場合のサンシャインカーボンアーク灯式およびキセノンアークランプ式に関する計算上の値としての促進倍率) および表 3.4.1.3 (色差に関する耐候性試験との相関性) に示す。

なお、各促進耐候性試験機については、第 5 章 屋外暴露耐候性と促進劣化試験の相関に関する研究 5.3.1 促進耐候性試験 の項にて詳述する。

また、屋外暴露耐候性試験の代替もしくは補完として行われる促進試験としては、上記の促進耐候性試験のほかに種々の促進腐食試験が開発され実用化されている。しかし、対象となる樹脂種や色相によっても試験結果が大きく異なるため、暴露試験との関係を掴むことは非常に困難であるのが実状であり、目的や用途に応じた個別の工夫が必要である。表面被覆工法に用いられる表面被覆材についても新たな提案が待たれるところである。

表 3.4.1.2 促進耐候試験機のエネルギー比較³⁾

試 験 機 名	時 間	促進倍率
暴露試験 (1 年) [298.4MJ/m ²]	8760	1
サンシャインカーボンアーク灯式 (78.5W/m ²) [0.2826MJ/m ² (1 時間)]	1055.9	8.3
キセノンアーク灯式 (60W/m ²) [0.216MJ/m ² (1 時間)]	1381.5	6.3

表 3.4.1.3 試験条件間の相関性⁸⁾

	御前崎 30°暴露		SWOM		キセノン	
	月	促進倍率	時間	促進倍率	MJ	促進倍率
ウレタン淡彩	16.5	1	2000	5.9	562.5	4.6
ウレタン濃彩	13.0	1	1370	6.8	375	5.4
アルキド淡彩	12.0	1	841	10.2	300	6.2

3.4.2 遮断性

(1) 遮塩性

多くの機関で採用されている試験方法は、1984 年に社団法人 日本道路協会が採用した道路橋の塩害対策指針 (案)・同解説に規定されている透過セル法である。この方法は試験対象塗膜を介して塗膜表面側に 3%食塩水、塗膜裏面側に蒸留水が面するように試験片をガラス製セルで挟み込み (図 3.4.2.1 参照)、管理された一定の環境下で 30 日間静置後、蒸留水側にどの程度塩化物イオンが透過しているかを塩素イオン電極による滴定、またはイオンクロマトグラフィー分析により求める。一般的な測定方法であるが、試験環境の管理や分析装置の操作の煩雑さ等、制約される場合がある。一方、定性的手法として、JSCE-K 524-2010 表面被覆材の塩化物イオンの浸透深さ試験方法 (案) がある。本法は、JIS A 1171 の 7.8 に準じて供試体中に侵入した塩化物イオンを、0.1%フルオレセインナトリウム水溶液および 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧して蛍光を発する箇所を測定する方法であるが、供試体によっては蛍光部分の判別が困難なものもあるといわれている。

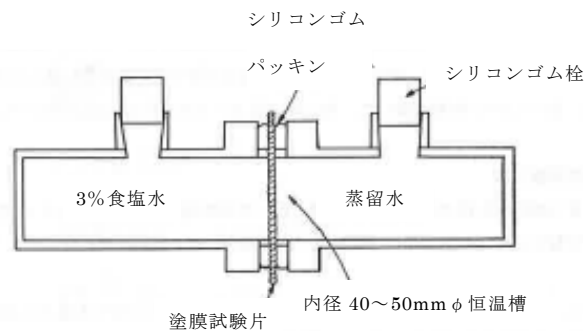


図 3.4.2.1 塩素イオン透過量測定の一例

(2) 酸素透過阻止性（酸素遮断性）

JSCE-K 521-2010 表面被覆材の酸素透過性試験方法（案）では、JIS K 7126-1 プラスチックフィルム及びシートーガス透過試験方法 - 第 1 部：差圧法，第 2 部：等圧法の 2 種類が規定されている。また，直接圧力をかける方法ではなく，水中に溶け込んだ溶存酸素の透過量を測定する製科研式酸素透過試験も採用されている。この試験装置はもともとコンタクトレンズの酸素透過性を測定するために開発された試験装置であり，ガス透過に比べコンパクトになっている。試験片の厚みによっては測定時間が長期に亘る場合がある。

現時点では双方とも試験方法自体に大きな問題はなく，長期にわたり採用されている試験方法である。

(3) 水遮断性

JSCE-K 523-2010 表面被覆材の透水量試験方法（案）では，JIS A 1404（1994）11.5 に規定される加圧法（写真 3.4.2.2），JIS A 6909（2010 追補）7.11（A 法）および 7.12（B 法）に規定されている方法（図 3.4.2.2）がある。加圧法では試験水压を用途によって変えることができるが，試験機の関係上供試体の大きさに制限がかかる場合がある。JIS A 6909 の A 法は加圧法同様，供試体の大きさに制限がある。ただ B 法については基本的に制限はないが，透水量の多い供試体では試験期間中蒸留水の補給が必要になる場合がある。

現時点では双方とも試験方法自体に大きな問題はなく，長期にわたり採用されている試験方法である。



写真 3.4.2.2 水遮断性試験（加圧法）

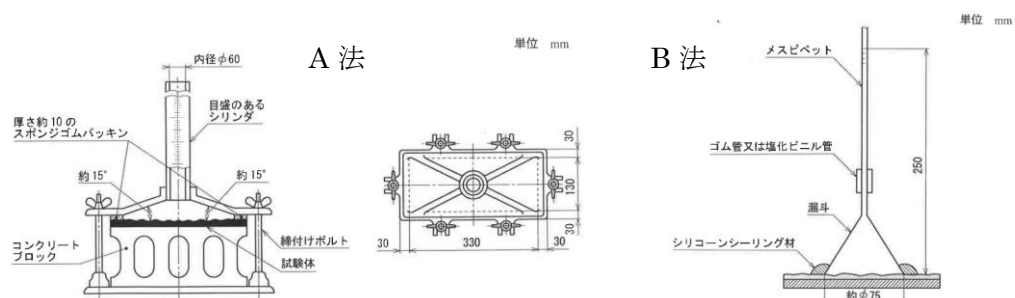


図 3.4.2.2 水遮断性試験の一例（JIS A 6909 7.11（A 法）および 7.12（B 法））

(4) 透湿性

透湿性試験は JSCE-K 522-2010 にも採用されている JIS A 1171 (2000) ポリマーセメント試験方法 7.13 透湿度試験, や JIS Z 0208 (1976) 防湿包装材料の透湿度試験方法 (カップ法) に示されている透湿カップによる試験方法が規定されている. JIS A 1171 の 7.11 では, 透湿カップに吸湿剤を入れて測定する吸湿による方法, 透湿カップに蒸留水をいれて測定する放湿による方法の 2 種類がある (図 3.4.2.3).

吸湿による方法は, 塗膜を透過してくる外部の水蒸気を中の吸湿剤がキャッチする量を測定する方法であるのに対し, 放湿による方法は, 内部の水蒸気が塗膜を通じて外部に透過する量を測定する方法である. どちらも測定結果について良好な関係を示す報告⁹⁾があり, 双方とも透湿性は把握できる. ただ, 放湿による方法は吸湿による方法と比較して, 実構造物内部の水分を放湿させることをイメージしているため実状に近いイメージで試験ができるが, ブランクの安定に時間を要する⁹⁾ことや, セットされたカップ中の蒸留水が, 測定時に試験片に触れると, ばらつきの原因になるため注意が必要である.

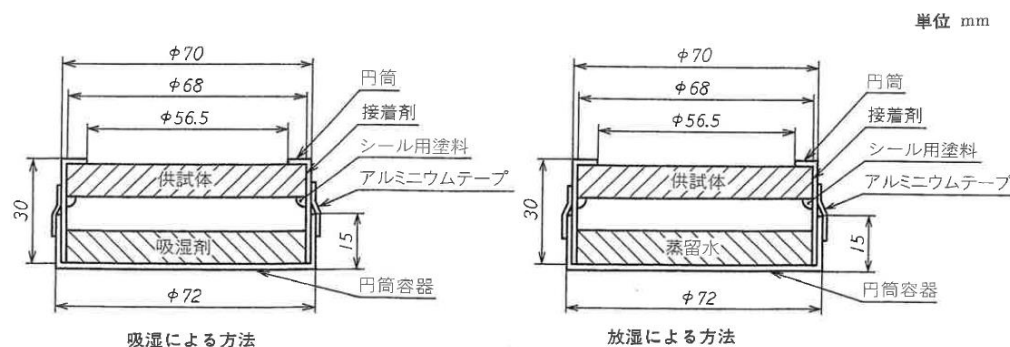


図 3.4.2.3 透湿試験方法 (JIS A 1171 の 7.11)

(5) 中性化阻止性 (促進中性化試験)

試験方法としては, JIS A 1153 : 2012 コンクリートの促進中性化試験方法にその評価手法が定められており, 雰囲気中の二酸化炭素濃度を高くすることによってコンクリートの中性化を促進させた場合の中性化深さを, フェノールフタレイン溶液を吹きかけることで, 中性化した層を判別する方法がとられている (中性化した層は無色で, 中性化していない層は濃い赤色を呈する). なお, 試験環境は温度: $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, 相対湿度: $(60 \pm 5)\%$, 二酸化炭素濃度 $(5 \pm 0.2)\%$ で行うとしている. ただ, NEXCO 東日本・中日本・西日本 構造物施工管理要領「コンクリート表面被覆の性能照査項目」, 西日本旅客鉄道(株): コンクリート構造物補修の手引き〔第五版〕「表面処理工の基本規格値および認定規格値」および首都高速道路(株)「コンクリート塗装及び FRP 補修基準」では, 相対湿度および二酸化炭素濃度に変更はないものの, 試験環境温度が $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ または 30°C で行うように規定されている. また, (社) 日本鉄道施設協会「東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物 維持管理標準」では, $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ で行うように規定されている. なお, 測定上の注意点として, 暴露供試体での中性化深さ測定では, 塗膜付近で濃い赤色を呈さず, 薄いピンクを示す場合があり, 正確な評価を行うには pH 測定が必要となる場合もあるため¹⁰⁾, 判定には注意を要する場合がある.

3.4.3 付着性

現在、殆どの機関が JSCE-K 531-2010 表面被覆材の付着強さ試験方法（案）に規定されている、鉛直方向への単軸引張による付着強度試験方法が採用されている。付着強度を測定する方法はどの機関も同一であるが、劣化後の付着強度を測定する場合、その劣化試験方法は各機関によって異なる。標準状態での試験は同じであるが耐久性を評価する目的で、促進耐候性試験や水分や温度差の影響を考慮した温冷繰り返しを実施した後等、試験片劣化後の二次物性評価として実施する場合、各機関の用途によって供試体の処理方法を考慮した試験条件を定めている。このような処理により塗膜自体にダメージを与え、付着強度の低下や破断個所の変化を読み取ることを目的としている。ただ、これまでに報告されている試験結果では基板破壊を示しているものが多く、試験片劣化後の付着強度を評価しても基板破壊を起こす傾向がある。また、付着強度（基板破壊のため基板の強度）自体も上昇傾向を示すものが多く、仕様間での有意差が判断しにくい状況である^{11) 12)}。中には基板破壊を起こすほどの付着強度または多くの機関で採用されている基準値である 1.0N/mm^2 をクリアしているにもかかわらず、周辺塗膜でははがれ現象を起こしている事例¹¹⁾もある。なお、付着性については、上述のような事例が多いため、付着性試験に対する取り組みを 3.5 節で詳述する。付着強度試験の実施状況を写真 3.4.3.1 に示す。



写真 3.4.3.1 付着強度試験

3.4.4 ひび割れ追従性

付着強さ試験と同様、殆どの機関が JSCE-K 532-2010 表面被覆材のひび割れ追従性試験方法（案）を採用している。予めひび割れを起こした試験板（図 3.4.4.1）を突き合わせ、切断面に沿って約 20mm 幅で不陸調整材をすり込むように塗布し、硬化後研磨紙にて余分の不陸調整材を除去後、試験板の両端 30mm を残して試験対象材料を塗布する。温度 $23\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度（ $50\pm 5\%$ ）で規定日数（28 日以上）養生後、材料試験機を用いて供試体の両端を挟み、塗膜の破断状況等を考慮しその距離を測定する（写真 3.4.4.1）。



写真 3.4.4.1 ひび割れ追従性試験の一例

標準条件での試験方法は何れの機関も同一であるが、試験片劣化後の二次物性評価として行う供試体の処理については、促進耐候性試験、低温状態、温冷繰り返し、アルカリ浸漬等、使用条件によって各機関が考慮した試験条件を規定している。

一方、実験室での初期性能および促進耐候性試験後等の性能は基準値を満足しているものの、実構造物では予想に反する短期間で躯体のひび割れに表面被覆材が追従できていない例がある¹¹⁾。考えられることとしては、現状のひび割れ追従性試験が初期の性能を把握することはできるが、長期に亘る耐久性を評価できていない。劣化状況を模擬した促進劣化試験としての促進耐候性試験や温冷繰り返し試験後の性能が、実際の屋外での劣化状況を反映しきれていないことが伺える。また、実構造物では躯体のひび割れ自体が常に動いているが、現

在の試験方法では、この常に動くひび割れに対する要因が加味されていない。すなわち、現状のひび割れ追従性試験に加え、常に動きを与える疲労試験的な要因も必要と考える。なお、第6章で行うひび割れ追従性試験は、 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ の環境下で JSCE-K 532 に従い実施している。

道路橋の塩害対策指針（案）・同解説（（社）日本道路協会 昭和 59 年 2 月）では、ダンベル状のフリー塗膜を用い、材料試験機で塗膜の伸びを測定することで伸び率を評価している（図 3.4.4.2）。JSCE-K 532 のひび割れ追従性試験方法は塗装系での試験とは異なり、

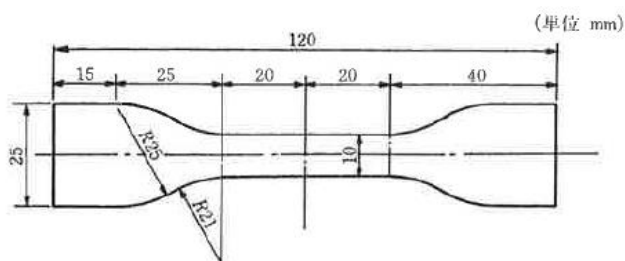


図 3.4.4.2 ダンベル状フリー塗膜の形状

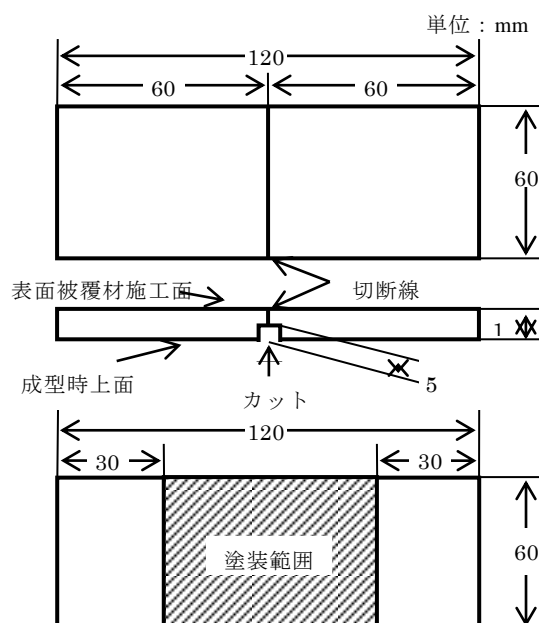


図 3.4.4.1 ひび割れ追従性試験に用いる試験板および塗装範囲

この試験は単膜での評価となる。したがって、主材と仕上げ材を個別に測定するため、コンクリートとの一体化した際の被覆材の追従性や、塗り重なった被覆材の追従性を判断するのは困難かと思われる。

阪神高速道路公団（現：阪神高速道路㈱）および（社）日本材料学会から発行されたコンクリート構造物の表面保護工便覧（案）・同解説（1989 年 3 月）⁹⁾ では、ひび割れ追従性試験として、

- ① 曲げひび割れを想定するもので、部材として曲率変化を伴ってひび割れが開口する場合での適用として「曲げ試験」、
- ② せん断ひび割れを想定するもので、ひび割れ面のずれを伴う場合での適用として「せん断試験」、
- ③ 膨張あるいは収縮等によるひび割れを想定するもので、部材としては、曲率を考慮する必要のない場合での適用として「両引試験」

の 3 種類が規定されており、ひび割れ追従性を検討する際、この 3 種類の試験方法の特徴を理解したうえで、対象とする構造物のひび割れの性質を考慮し、必要な試験法を選択することとしている。なお、繊維などによる補強がある場合（ライニングの剛性が極度に高い場合）は、曲げ試験あるいはせん断試験を行うのが良いとされている。

3.4.5 表面被覆工法の性能評価に関する試験方法のまとめ

3.4 節では、コンクリート構造物に適用される表面被覆工法の性能を把握するために必要な表面被覆材の試験方法について述べてきた。求められる性能を評価する「評価項目」は一つでも、その試験方法は必ずしも一つではなく、複数の試験条件を有しており、どの方法も

表 3.4.5.1 表面被覆工法に用いられる表面被覆材の評価項目別試験方法一覧

分 類	要求性能	JIS	JSCE	その他	採用している機関の一例	主な問題点
長期耐久性	屋外暴露耐候性	K 5600-7-6	K 511		HDK コンクリート表面保護工	・長期間を要する ・暴露環境による差
	促進耐候性	K 5600-7-7	K 511		日本道路協会 道路橋の塩害対策指針 (案) JR西日本 表面処理材基本規格値, 認定規格値 東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準品質規格値 HDK コンクリート表面保護工の性能	・屋外での暴露耐候性試験との相関性が不明確 ・機関によって試験時間が異なる
		参考文献 K 5400 K 5600-7-8	K 511		NEXCO 構造物施工管理要領 コンクリート表面被覆材の性能照査	・試験装置 (キセノン, サンシャイン)
		A 1143 A 1148				
	凍結融解抵抗性					
耐薬品性	はく落防止性		K 533		NEXCO 構造物施工管理要領 東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準品質規格値 SDK 橋梁構造物設計要領 剥落防止工評価基準	・試験に供する試験板が大きい ・供試体の取り扱いに注意を要する ・機関によって試験箇所 (コア) の前処理方法が異なる
	耐アルカリ性				日本道路協会 道路橋の塩害対策指針 (案) 日本下水道事業団 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル 塗布型ライニング工法の品質規格 HDK コンクリート表面保護工 JR西日本 表面処理材基本規格値 NEXCO 構造物施工管理要領 コンクリート表面被覆材の性能照査 SDK コンクリート塗装及びFRP補修基準 東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準品質規格値	
耐薬品性	耐酸性	K 5600-7-6-2			日本下水道事業団 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル 塗布型ライニング工法の品質規格	基板がモルタルのため、エンツ部の包み込みが不十分な場合、欠陥部分から酸が侵入して供試体が破損する場合があるので、供試体作製には注意が必要
	付着性	K 5600-5-7	K 531		日本道路協会 道路橋の塩害対策指針 (案) 日本下水道事業団 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル 塗布型ライニング工法の品質規格 HDK コンクリート表面保護工 JR西日本 表面処理材基本規格値 NEXCO 構造物施工管理要領 コンクリート表面被覆材の性能照査 SDK コンクリート塗装及びFRP補修基準 東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準品質規格値	・試験後の破壊状態が基板破壊が多いため、表面被覆材同志の性能比較が困難 ・基板破壊の場合でも試験箇所周辺塗膜がはがれる場合があった
遮断性	二酸化炭素遮断性 (中性化阻止性)	A 1153			JR西日本 表面処理材基本規格値, 認定規格値 NEXCO 構造物施工管理要領 コンクリート表面被覆材の性能照査 SDK コンクリート塗装及びFRP補修基準 東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準品質規格値	変色程度が浅い試料があり、中性化域の区別が困難な場合がある
	水遮断性	A 1404	K 523		日本下水道事業団 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル 塗布型ライニング工法の品質規格 JR西日本 表面処理材基本規格値, 認定規格値	供試体の大きさに制限あり
		A 6909 7.11				
		A 6909 7.12			HDK コンクリート表面保護工の性能 NEXCO 構造物施工管理要領 コンクリート表面被覆材の性能照査	透水量の多い供試体では試験期間中、蒸留水の補給が必要
	透湿性 (水蒸気透過性) (水蒸気透過阻止性)	A 1171 7.13	K 522		HDK コンクリート表面保護工の性能 JR西日本 表面処理材基本規格値, 認定規格値 NEXCO 構造物施工管理要領 コンクリート表面被覆材の性能照査 東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準	・放湿法の場合、吸湿法に比べ、ブランクの安定に時間を要する ・フリー塗膜を透湿カップにセットする際、吸湿剤ができるだけ過剰な水蒸気を吸湿しないよう注意する
		Z 0208				フリー塗膜を透湿カップにセットする際、吸湿剤ができるだけ過剰な水蒸気を吸湿しないよう注意する
	酸素透過阻止性	K 7126-1-第1部	K 521		HDK コンクリート表面保護工の性能 東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準品質規格値	
		K 7126-1-第2部		製科研式	NEXCO 構造物施工管理要領 コンクリート表面被覆材の性能照査 JR西日本 表面処理材基本規格値, 認定規格値	厚膜試料では長時間を要する
	塩化物イオン透過阻止性	参考文献 K 5400 A 1171 7.8	K 524		道路橋の塩害対策指針 (案) NEXCO 構造物施工管理要領 コンクリート表面被覆材の性能照査	アルカリ成分が溶け出す試料は、分析前の前処理が必要
	硫黄の浸透阻止性 (硫黄の侵入深さ)			日本下水道事業団	日本下水道事業団 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル 塗布型ライニング工法の品質規格	変色域が不明瞭なため、評価困難な場合がある
ひび割れ追従性	ひび割れ追従性		K 532		NEXCO 構造物施工管理要領 コンクリート表面被覆材の性能照査 HDK コンクリート表面保護工便覧 (案) 同解説 JR西日本 表面処理材基本規格値, 認定規格値	試験室でクリヤーした場合でも、実構造物のひび割れに追従できないものがある
		A 6909, A 6021			道路橋の塩害対策指針 (案)	フリーフィルム (単膜) での測定のため、塗装系としての評価が困難であり、母材に付着した状態での性能把握が困難
防汚性	防汚性			土木研究センター	土木研究センター 防汚材料促進試験方法	
				SDK	SDK コンクリート塗装及びFRP補修基準	試験機が特殊

使用される環境を考慮した条件設定がなされている。そこで、表面被覆工法に用いられる表面被覆材の評価項目別試験方法および主な問題点をまとめたものを表 3.4.5.1 に記す。

表面被覆材の耐久性を評価する際、その求められる性能を様々な項目で評価を行う。しかし、第 2 章で記したように実験室レベルでの試験片評価が、実構造物での評価と一致しない事例が多々あるのが現状であり、可能な限り両者が一致する試験方法の検討が望まれるところである。表面保護工の劣化現象および機構を把握することが重要である。表面保護工法の一つである表面被覆工法では、表面被覆による透過制御が要求性能として挙げられる。この透過制御に関しては、躯体に悪影響を与える環境因子を透過させない「緻密」、ピンホールやひび割れ等の無い塗膜を形成する「無欠陥」、はがれや浮きのない「密着」の三点が挙げられる。この三点の性能を評価するには、「緻密」については透過性、「無欠陥」についてはひび割れ追従性、「密着」については付着性がそれぞれ重要な試験項目である。すなわち、透過制御が完全であれば、表面被覆材としての性能を十分に発揮できることとなる。この透過制御に代表される遮断性は、表面被覆材の付着性およびひび割れ追従性が低下すると極めて低下する。したがって、本論文では、この遮断性低下を生じさせないように、試験方法の簡便さも考慮し、付着性およびひび割れ追従性に着目する。また、本来、表面被覆工法として用いられる表面被覆材の耐久性を評価するには、単に要求される性能を評価するだけでなく、実際に劣化した表面被覆材の性能を評価しなければならない。現在、適用されている試験方法は、初期の性能は抑えられるものの、劣化後の性能を予想するには十分な試験方法とは言えない。表面被覆材の耐久性を評価するには、初期性能だけでなく、屋外暴露耐候性との相関のとれる促進試験後の二次物性を評価することが重要である。したがって、実状に近い状態での耐久性評価が行えるよう、促進試験方法にも着目する。

3.5 付着強度試験の現状とはく離試験の検討

現在、表面被覆工法に用いられる表面被覆材のコンクリート補修材における付着性を評価する方法としては、付着強度試験（JSCE-K531-2010）で示されている単軸引張りによる試験方法が、一般的に採用されている。NEXCO 構造物施工管理要領の表面被覆材の性能照査や JIS A 6909（2010）建築用仕上塗材 に示されている付着強度試験は、この単軸引張りによる方法を採用している。

・塗膜のはく離現象の一例

NEXCO では平成 6 年度に表面被覆材 8 仕様について、橋脚 4 本を対象に試験塗装¹¹⁾を行い、同時に同仕様の供試体を作製して（高知県 浦戸大橋 料金所用地内）暴露試験を開始した。試験塗装橋脚および暴露供試体について、1 年目の調査（平成 8 年 2 月）を実施したところ、橋脚および暴露供試体に付着性の欠陥は認められなかった。しかし 3 年目の調査（成 10 年 2 月）では、試験塗装を行った橋脚での表面被覆材の付着性が悪く、簡易的にカッターナイフはく離試験を行ったところ、一部の表面被覆材におい

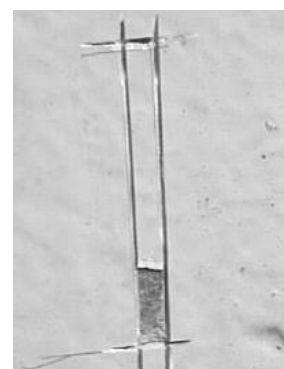


写真 3.5.1 カッターナイフはく離試験後ののはく離状況

てはく離現象が認められた(写真 3.5.1). なお, このカッターナイフはく離試験の結果は, 橋脚と暴露供試体双方において 8 仕様中 6 仕様で同様の傾向が認められている. また, カッターナイフはく離試験結果と橋脚での塗膜外観評価での欠陥の有無とを比較した場合, 3 項目とも同じ傾向を示した仕様が 3 仕様, どちらか一方と一致した仕様が 2 仕様であった. 表 3.5.1 に, 橋脚の塗膜外観評価結果および橋脚と暴露供試体のカッターナイフはく離試験結果を示す.

また暴露供試体には, 付着力低下の原因と思われる僅かな膨れの発生が認められたが, 単軸引張による付着強度試験方法によって付着強度の低下を検証したところ, いずれの暴露供試体も NEXCO 東日本・中日本・西日本 構造物施工管理要領「コンクリート表面被覆材の性能照査項目」に示されている 1.0N/mm^2 以上の付着強度を示していた. 付着強度測定を実施した後, その暴露供試体を詳細に観察すると, 測定用治具を取り付けるためにカットした周囲で, 塗膜のはがれ(写真 3.5.2)が一部に認められた. 表面被覆材の付着性を評価するのに, 単軸引張りによる付着強度試験だけで評価することの危険性が確認された. 付着性に関しては,

- ① コンクリート界面の脆弱層の生成
- ② 界面での水分や異物の介在
- ③ 塗膜の内部応力の差による影響

等に注意する必要がある. なお, この供試体の塗装系における各層の内部応力は, プライマー: 0.59N/mm^2 , 不陸調整材: 0.365N/mm^2 , 主材: 0.14N/mm^2 , 仕上げ材: 0.10N/mm^2 で, プライマーが最も大きい値を示していることから, プライマーの関わるコンクリート基板表層部ではのがれが起きたものと考え^{11), 13)}.



写真 3.5.2 塗膜のはがれ状況の一例

表 3.5.1 橋脚と暴露供試体のカッターナイフはく離試験および外観評価結果

種類	橋脚のはく離結果	暴露供試体のはく離結果	橋脚塗膜の外観評価
1	無	有	極小さな塗膜はがれ
2	無	無	異常なし
3	有	有	異常なし
4	有	有	打継部塗膜割れ
5	無	無	異常なし
6	無	有	異常なし
7	有	有	異常なし
8	有	有	異常なし

そこで, 付着性をはく離現象も含めて定量的な評価ができないかという考えのもと, はく離現象を仕事量で示すはく離試験の検討を行う. 屋外暴露耐候性試験後の単軸引張による付着強度試験およびはく離現象を考慮した 2 種類のはく離試験(カッターナイフはく離試験, 見かけのはく離抵抗性試験)について, 破壊状況の異なる例を写真 3.5.3 に示す.

なお、2種類のはく離試験方法については、3.6節および3.8節に示す。

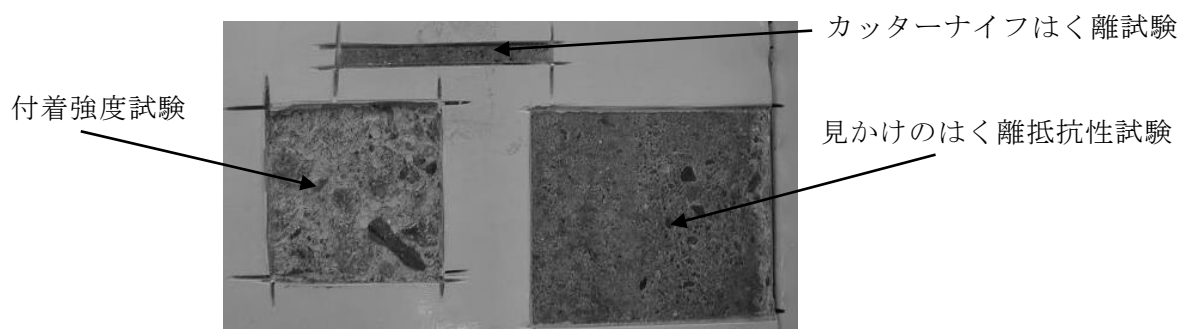


写真 3.5.3 試験方法による破壊箇所の違いの一例

3.6 カッターナイフはく離試験の提案

3.5節で示したカッターナイフはく離試験は、橋脚と暴露供試体の間で比較的良好な関係を示し、橋脚の塗膜の外観調査結果とも類似した傾向が見受けられている。以下に今回実施したカッターナイフはく離試験の試験方法を、実橋脚等、現場で実施可能なはく離現象を考慮した簡易的な付着性を評価する試験方法として記す。

[カッターナイフはく離試験^{11), 13)}]

本試験は、実橋脚等、現場で実施可能であり、はく離現象を考慮した簡易的な付着性を評価する試験方法である。

① 試験方法

試験面にダイヤモンドカッターにて 50mm×5mm のコンクリート素地に達する切り込みを入れ、カット部の短辺をカッターの刃先で弾き上げることで塗膜のはく離を促し、はく離した長さを測定する。カッターナイフはく離試験の測定状況を写真 3.6.4 に、その評価基準を表 3.6.2 に示す。

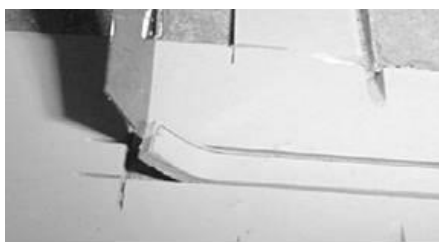


写真 3.6.4 カッターナイフはく離試験実施状況

② 評価方法

カッターナイフはく離試験はばらつきを考慮して3箇所を実施する。3個のはく離長さの平均値に対して表 3.6.2 に示すカッターナイフはく離試験評価基準に基づき3段階に設定したレベルで評価を行う。また、付着強度試験と同様に破壊箇所についても評価する。なお、今回用いるカッターナイフはく離試験方法は、実構造物での付着性を定性的に確認する目的で実施している簡易手法であり、塗膜の端をカッターナイフで弾きあげる際の力の入れ方で個人差が生じる恐れがあることや、過度の力で弾きあげることで基板脆弱部が破壊される恐れがあるので注意を要する。試験実施には本試験法を理解し、指導者の立会いのもと実施するのが望ましい。

表 3.6.2 カッターナイフはく離試験評価基準

はく離長さ (mm)	評価	適 用
0 (最小) ～2	レベルⅠ	はく離なし, あるいは極めてわずかなはく離
3 ～ 10	レベルⅡ	はく離するが比較的短い長さで停止
11～50 (最大)	レベルⅢ	比較的容易なはく離から全面はく離

3.7 はく離試験条件の検討

この試験の検討にあたっては, 単軸引張による付着強度試験のように塗膜の付着面に対し, 鉛直方向に引きはがすのではなく, ある程度の角度をもたせてはく離させ, その仕事量を求めることを目的とする.

また, 付着力 (はく離する際の抵抗) を定量的に把握するために, はく離角度, はく離速度 (引張速度) を検討し, 事前確認試験を行うこととする. なお, 表 3.7.1 に示す JIS に規定されている接着剤および粘着テープなどに関する試験方法に適用されている測定条件を参考に, 試験条件の検討を行う.

(a) はく離角度の検討

粘着テープやゴム等のはく離試験を実施する際のはく離角度は, 一般的に 90 度と 180 度が採用されている. 厚膜塗膜や脆い塗膜の場合, 180 度で折り返す時点で塗膜に割れが生じたり, 弾力性のあるものは余計な負荷がかかり, 測定できないものが多いことが考えられる. そこで図 3.7.1¹⁴⁾を参考に, 90 度と 180 度の中間で, 測定角度が少々ずれても測定結果に与える影響が小さいと考えられる, 135 度と 90 度の 2 水準について検討を行う.

表 3.7.1 接着剤および粘着テープのはく離試験条件

JIS 番号	規 格 名	測定角度および引張速度(mm/min)		
		180	90	T 型
K 6256	加硫ゴムの接着試験方法	—	50±5	50±5
K 6854	接着剤の接着強さ試験方法	200±20	—	100±10
K 0237	粘着テープ・粘着シート試験方法	300±30	300±30	—

(b) 引張速度

引張速度は, 塗膜の強度を考慮し, 50, 100, 300mm/min の 3 水準について, 布粘着テープ (積水化学㈱製 [JIS Z 1524 相当品]) による予備試験を行う.

(c) 布粘着テープによる予備試験

① 試験方法

鋼板 (100×200×4mm) の上に布粘着テープの粘着面を下にして置き, 重さ 2kg のローラーを 5 往復させて鋼板に確実に貼り付け (写真 3.7.1), はく離に要する力を測定.

② 測定結果

布粘着テープによる予備試験のはく離力を用い, 式(1)により, はく離抵抗値(N/mm)を求める.

$$\text{はく離抵抗値(N/mm)} = \frac{\text{はく離力(N)}}{\text{はく離長さ(mm)}} \dots\dots\dots (1)$$

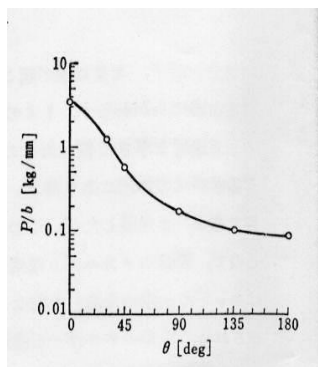


図 3.7.1 はく離長さとはく離角度



写真 3.7.1 布粘着テープの貼りつけ

③ 布粘着テープによる予備試験のまとめ

90 度および 135 度ではく離試験状況を, 写真 3.7.2 および写真 3.7.3 に示す. また, はく離角度と速度を変化させた結果を, 表 3.7.2 に示す. この結果より, はく離力測定条件は, 以下のものが適切と考え, はく離性の評価手法として採用することとする.

はく離角度 : 135 度, 引張速度 : 100mm/min

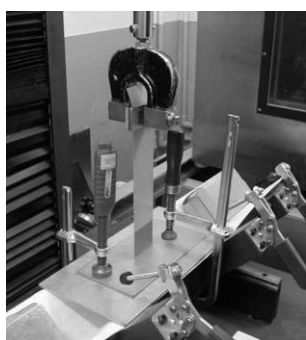


写真 3.7.2 はく離試験 (90 度)



写真 3.7.3 はく離試験 (135 度)

表 3.7.2 予備試験測定条件結果

	50mm/min	100mm/min	300mm/min	備 考
90 度	測定開始直後に大きなピークが現れ, 同一チャート上ではく離力のバラツキ大. ×	再現性が悪い. チャートパターンが異なる. ×	測定開始直後に大きなピークが現れ, スタート時に異常な力がかかる. ×	テープ粘着面のいと引き現象が大きい.
135 度	再現性が悪い. 同一チャート上ではく離力のバラツキ小. ×	再現性が良い. 同一チャート上ではく離力のバラツキ小. ◎	測定開始直後に大きなピークが現れ, スタート時に異常な力がかかる. ×	

3.8 見かけのはく離抵抗性試験^{11), 12)}の提案

(a) 前処理

図 3.8.1 に示すように幅 50mm 長さ 60mm の素地に達するカットを行った後、端から 10mm の部分を素地からカッターナイフではく離する。

長さ 210mm の布粘着テープ (JIS Z 1524 相当品) をはがした塗膜の下面に貼り、別に長さ 260mm の布粘着テープ (JIS Z 1524 相当品) をカットした部分の上面に貼り、2 枚の布粘着テープで塗膜を挟み込むように接着する

(図 3.8.2)。なお、今回用いた布粘着テープは、JIS Z 1524 に示されている粘着力が 20N/10mm 以上のものを使用した。

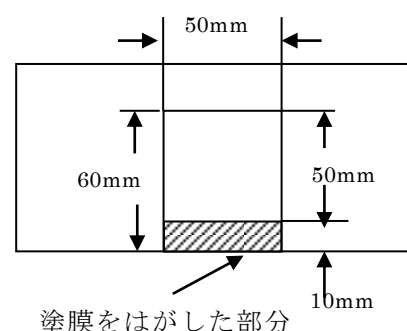


図 3.8.1 供試体のカット方法

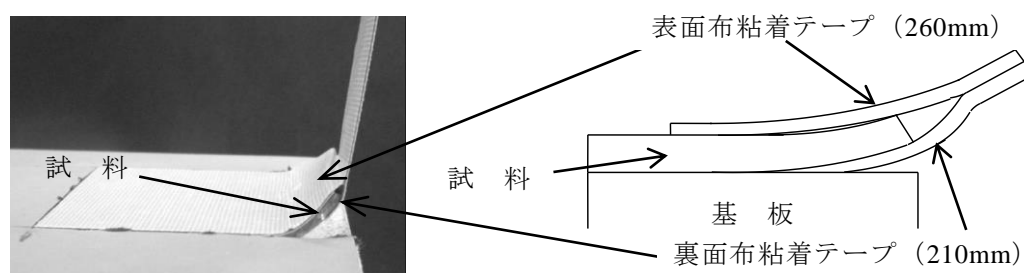


図 3.8.2 布粘着テープの貼りつけ方 (詳細)

(b) 測定方法

この供試体を写真 3.8.1 および写真 3.8.2 に示すように、布粘着テープを 135 度方向へ引張速度 100mm/min の力で引っ張り、同時に布粘着テープの角度がずれないように、供試体を向かって右方向へ移動させながらはく離力を測定する。



写真 3.8.1 試験状況

(c) 評価方法

当初、はく離抵抗値で評価する予定であったが、この方法で算出すると塗膜強度の強いサンプルははく離長さが長く、塗膜強度が弱いサンプルは試験開始と同時に塗膜が切断され、はく離長さが著しく短くなる。塗膜強度がはく離抵抗値結果を大きく左右し、塗膜強度の強いものがはく離抵抗値が小さくなる結果となる。そこで接着力の測定方法を参考に、塗膜の粘弾性的な性質も測定結果に反映させることを考慮して、純粋なはく離抵抗性ではなく“見かけのはく離抵抗性”として評価することとする。

したがって、以下に示す算出方法により、当初はく離抵抗値として検討していたものを、見かけのはく離抵抗性として算出することとする。

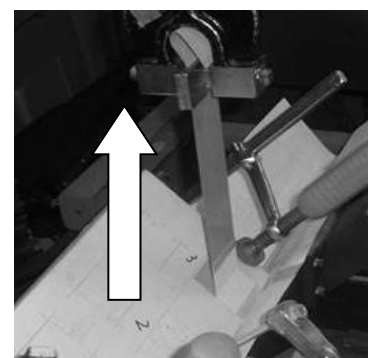


写真 3.8.2 試験状況

[見かけのはく離抵抗性試験]

定 義

見かけのはく離抵抗性：はく離に要した仕事量(N・mm)をはく離面積(mm²)で除した値

はく離面積：図 3.8.4 に示すはく離面及び式(4)の塗膜のはく離面積(mm²)

はく離に用いた仕事量： 図 3.8.5 に示す仕事量 A 及び式(1)の仕事量 (N・mm)

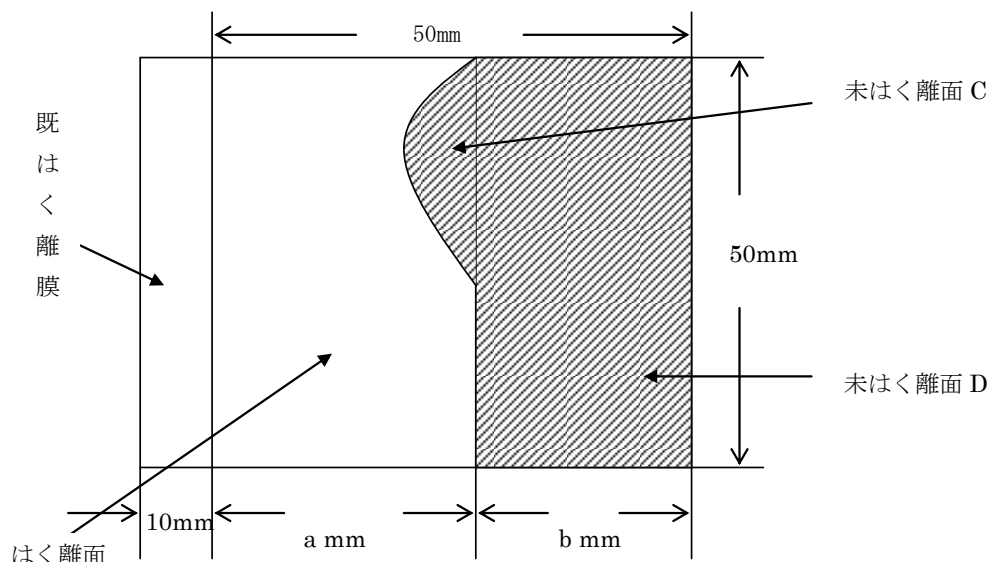


図 3.8.4 はく離面積

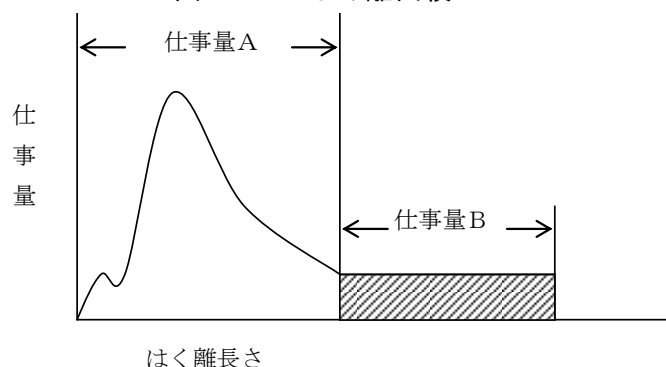


図 3.8.5 塗膜はく離仕事量

算出方法

はく離に用いた仕事量(N・mm)

$$= \text{仕事量 A (N・mm)} - \text{未はく離面 C の仕事量 (N・mm)} \dots \dots \dots (1)$$

未はく離面 C の仕事量

$$= \text{布粘着テープと仕上げ（上塗り）材との見かけのはく離抵抗性 (N・mm/mm}^2\text{)} \\ \times \text{未はく離面積 C (mm}^2\text{)} \dots \dots \dots (2)$$

布粘着テープと仕上げ材（上塗り）との見かけのはく離抵抗性(N・mm/mm²)

$$= \text{仕事量 B (N・mm)} \div \text{未はく離面 D (mm}^2\text{)} \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{はく離面積 (mm}^2\text{)} = (50\text{mm} \times a \text{ mm}) - \text{未はく離面 C (mm}^2\text{)} \dots \dots \dots (4)$$

未はく離面 C(mm²)=実測

$$\text{未はく離面 D (mm}^2\text{)} = (50\text{mm} \times b \text{ mm}) \dots \dots \dots (5)$$

3.9 まとめ

本章では、表面保護工に求められる要求性能および表面被覆工法についてのまとめを行い、表面被覆工法に用いられる表面被覆材に要求される耐久性評価に関する試験方法の現状およびその問題点についてまとめた。表面被覆工法では、表面被覆による透過制御が要求性能として重要である。この透過制御に代表される劣化因子の遮断性は、表面被覆材の付着性およびひび割れ追従性が低下すると極めて低下する。この遮断性低下を生じさせないように、試験方法の簡便さも考慮し、付着性およびひび割れ追従性に着目する。なお、付着性については、従来から行われている付着強度試験の問題点および新評価手法について検討・提案を行った。また、耐久性を把握するため、屋外暴露耐候性との相関性が期待される促進試験の検討も必要である。

得られた成果を以下にまとめる。

(1) 表面被覆工法に用いられる表面被覆材に関する試験方法の問題点および検討のまとめ

- ① 塗膜の耐久性を評価する場合、屋外暴露耐候性試験での評価が望ましいが、結果を得るまでに長期間を要することや暴露環境によって結果が異なることがある。
- ② 上記より、短期間に結果が判明することおよび常時同じ環境条件で試験できること等の理由により、促進試験が多用されている。しかし、屋外暴露耐候性試験との相関を得ることは困難である。
- ③ 表面被覆工法に用いられる表面被覆材の耐久性を確認する項目のうち、主に付着性を評価する際に用いられている単軸引張による付着強度試験を行ったところ、基準値である 1.0N/mm^2 を上回っているにもかかわらず、その試験箇所周辺の塗膜のはがれる現象が発生する事例があった。
- ④ 表面被覆工法では、表面被覆による透過制御が要求性能として重要である。この透過制御に代表される遮断性は、表面被覆材の付着性およびひび割れ追従性が低下すると極めて低下する。この遮断性低下を生じさせないように、試験方法の簡便さも考慮し、付着性およびひび割れ追従性に着目する。また、耐久性を把握するため、屋外暴露耐候性との相関性が期待される促進試験の検討も必要である。

(2) 付着性評価手法の検討および提案

- ① (1)の③で示した状況に加え、暴露供試体と橋脚での簡易的なはく離試験を実施したところ、はがれに対して双方とも同様の傾向を示すものが確認できた。また、橋脚塗膜の外観評価についても良好な関係がみられている。
- ② ①より、付着性を評価する際、従来からの単軸引張による付着強度試験だけでなく、塗膜のはがれ現象を考慮した“はく離試験”が必要と判断する。
- ③ 単軸引張による付着強度試験に加えて、はがれ現象を考慮した付着性評価手法として、定性的方法である“カッターナイフはく離試験”および定量的方法である“見かけのはく離抵抗性試験”を検討し、提案する。
- ④ 今後、付着性を評価するには、はがれ現象を考慮した“カッターナイフはく離試験”および“見かけのはく離抵抗性試験”を併用し、従来法では性能差を評価し辛かった付着性の評価を行うこととする。

[第3章 参考文献]

- 1) (社) 土木学会：2005 年制定 コンクリートライブラリー 119 表面保護工法設計施工指針(案)，2005
- 2) (社) 色材協会 関西支部：第 41 回 塗料講座，pp.96-pp.107，平成 20 年 8 月
- 3) 社団法人 日本塗料工業会：各種耐候試験機の調査研究報告，2003. 4
- 4) 飯田 眞司：促進耐候性試験（その 3），塗料の研究 No.147，pp.26-pp.34，Mar.2007
- 5) 橋本和仁，藤嶋昭：用水と廃水，36，851（1994）
- 6) 村澤貞夫：J.Jpn.Soc.Colour Mater（色材），69[7]，444（1996）
- 7) G.Kaempf, W.Papenroth, R.Holm：J.P.T.46, [No.598], 56（1974）
- 8) 社団法人 日本塗料工業会：建築構造物用塗料の耐候性に関する研究（報告書 第 2 報），2000. 10
- 9) 阪神高速道路公団 社団法人 日本材料学会：コンクリート構造物の表面保護工便覧（案）・同解説 コンクリート床版防水工設計施工指針（案）・同解説，1989. 3
- 10) 野村 倫一，山田 卓司，荒木 弘祐：再アルカリ化後に施工した表面被覆工法の経年調査結果，土木学会次学術講演会，Vol.66，2011
- 11) 樺山好幸，吉田幸信，吉田敦，山田卓司，宮川豊章：塗装系防食材の追跡調査に基づく耐久性能評価と付着性能評価手法の提案，コンクリート工学論文集，Vol.14, No.3, pp.11-22, 2003.3
- 12) 山田 卓司，佃 洋一，山本 貴士，国枝 稔，宮川 豊章：表面被覆工法の付着特性に着目した耐久性評価方法に関する研究，材料，Vol.61, No.10, pp.715-720, 2012.10
- 13) 山田 卓司：コンクリート塗装材における塗膜の耐久性評価の考え方，Vague，日塗検ニュース，第 122 号，pp.12-17, 2008
- 14) 接着ハンドブック第 2 版：日本接着協会編，pp.75-76,1980

第4章 屋外暴露環境下での表面被覆工法の耐久性評価に関する研究

4.1 はじめに

表面保護工に適用される表面被覆工法の耐久性を評価する方法は、多くの機関で定められ、規定された性能値を満足することを必須条件として表面被覆工法の選定を行っている。

その性能を評価する試験方法は、表面被覆工法に用いられる表面被覆材の性能を多方面から定量的に把握できるように設定されている。しかし、試験室内での試験では性能を満足する一方、現場の構造物の環境によっては異なる結果を得る場合があるのも事実である。

近年の性能規定型の設計あるいは維持管理体系への変遷の中で、表面被覆材およびこれらを用いたシステムの性能評価が必要となってきた。

表面被覆材の耐候性や遮断性等の高性能化とこれを用いた工法によるコンクリート構造物の高耐久化を実証し、かつ、その性能を統一の条件下で包括的に評価する試験方法の提案を目的として、表面被覆材に関する試験を2006年（平成18年）より実施している²⁾。共通の条件および項目のもとで試験し、最長15年を目指した実環境暴露試験と暴露後の付着性能や遮断性能等の物性試験を定期的実施し、各種表面被覆材の耐久性能を評価している。屋外での暴露試験で塗膜が劣化した状態の付着性やひび割れ追従性等、試験片劣化後の物性を二次物性として評価することで、表面被覆工法の耐久性を把握することとした。検討対象とした評価項目は、塗膜の外観評価、表面被覆材の基本性能ともいわれる付着性能、ひび割れ追従性能および外的要因の侵入を抑制するための遮断性能としての透水性能である。

4章では、現在、表面保護工として使用されている表面被覆工法を対象に、表面被覆材の性能として重要なものの一つであり、従来の試験方法ではその性能差を評価しにくい事例がある付着性に着目し、その耐久性評価手法の検討を行った結果について述べる。

4.2 試験概要

本章では、表面被覆工法に用いられる表面被覆材の耐久性を評価するため、4.3節に示す工法について各塗装仕様に従って作製された試験片を用い、屋外暴露耐候性試験を行う。なお、屋外暴露耐候性に供した試験片は、一般財団法人日本ウエザリングテストセンターの所有する銚子暴露場にて屋外暴露試験を行っている。また、同時に初期物性確認用の供試体にて、初期物性評価を行い、屋外暴露耐候性試験で経年劣化した暴露試験片を用い、表面被覆材の性能として重要なものの一つである付着性に着目し、その耐久性評価手法の検討を行う。

4.3 試験実施工法

今回試験に供した工法は、現在、コンクリート構造物の補修や予防保全に適用されている表面被覆工法で、使用している主材の多くを占める、

- ① エポキシ樹脂系（柔軟形を含む） 6種類
- ② 変性アクリル系 2種類
- ③ クロロプレンゴム系 2種類
- ④ ウレアウレタン系 1種類
- ⑤ ポリマーセメント系（アクリルエマルジョン系）[柔軟形を含む] 4種類

の 5 種類を選定し，水セメント比 50%，砂セメント比 3 のモルタルを，内のり 150mm×70mm×20mm の型枠を用いて成型したモルタル板（日本テストパネル㈱にて一括作製）に，表 4.3.1 に示す 15 工法を各工法によって推奨されている所定の施工方法に従って施したものを試験片として試験に供する．各社の塗装仕様を表 4.3.2～表 4.3.16 に示す．

表 4.3.1 試験に供した表面被覆工法一覧

工法	主材[膜厚：μm]	仕上げ材（上塗材）[膜厚：μm]
E1	エポキシ樹脂系（160μm）	柔軟形ウレタン樹脂系（30μm）
E2	エポキシ樹脂系（186μm）	ふっ素樹脂系（30μm）
E3	エポキシ樹脂系（150μm）	ふっ素樹脂系（30μm）
E4	エポキシ樹脂系（320μm）	柔軟形ふっ素樹脂系（30μm）
E5	エポキシ樹脂系（1000μm）	ふっ素樹脂系（38μm）
E6	柔軟形エポキシ樹脂系（200μm）	アクリルウレタン系（30μm）
MA1	変性アクリル系（800μm） [メタクリル酸メチル]	ウレタン系（80μm）
MA2	変性アクリル系（800μm） [メタクリル酸メチル]	ふっ素樹脂系（80μm）
R1	クロロプレンゴム系（265μm）	クロロスルホン化 ポリエチレンゴム系（70μm）
R2	クロロプレンゴム系（465μm）	ハルスハイブリッド系（60μm） [クロロスルホン化ポリエチレンゴム]
U1	ウレアウレタン系（2250μm）	アクリルウレタン系（80μm）
C1	ポリマーセメント系（465μm） [アクリルエマルジョン]	ポリマーセメント系（1050μm） [アクリルエマルジョン]
C2	ポリマーセメント系（660μm） [アクリルエマルジョン]	アクリルシリコン系（75μm）
C3	ポリマーセメント系（660μm） [アクリルエマルジョン]	アクリルシリコン系（75μm）
C4	柔軟形ポリマーセメント系（1950μm） [アクリルエマルジョン]	アクリルウレタン系（50μm）

表 4.3.2 E1 (エポキシ系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加(%)	施工 方法	塗 布 間隔 (h)
下地調整材 イ)プライマー	エポキシ樹脂系 (レジガードEPプライマー)	主剤:硬化剤 = 1 : 1	1 0 0	(50)	刷毛, ローラー 塗り	2
ロ)不陸調整材	エポキシ樹脂系 (レジガードパテSHグレー)	主剤:硬化剤 = 2 : 1	5 0 0	—	ヘラ 付け	1 6
主 材 ・中塗	エポキシ樹脂系 (レジガード#200EH中塗)	主剤:硬化剤 = 9 : 1	3 5 0	(5)	刷毛, ローラー 塗り	1 6
仕上げ材 ・上塗	柔軟形ウレタン樹脂系 (レジガード#200柔軟形ウレ タン上塗)	主剤:硬化剤 = 8 : 2	1 2 0	(5)	刷毛, ローラー 塗り	—

表 4.3.3 E2 (エポキシ系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下地処理材 イ)プライマー	エポキシ樹脂系 (KCエポプライマー)	主剤:硬化剤 = 4 : 1	1 0 0	テクトEP シンナー(40)	刷毛 塗り	1 9
ロ)不陸調整材	エポキシ樹脂系 (KCエポパテ)	主剤:硬化剤 = 2 : 1	5 0 0	—	刷毛 塗り	1 2 2
主 材 ・中塗	エポキシ樹脂系 (KCエポエラスト100)	主剤:硬化剤 = 8 : 1	2 6 0	テクトEP シンナー(5)	刷毛 塗り	4 8
仕上げ材 ・上塗	ふっ素樹脂系 (KCフロンエラスト)	主剤:硬化剤 = 6 : 1	1 5 0	テクト上塗 シンナー(5)	刷毛 塗り	—

表 4.3.4 E3 (エポキシ系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗布 間隔(h)
下地処理材 イ)プライマー	エポキシ樹脂系 (ACプライマー)	主剤:硬化剤 = 2 : 1	1 5 0	—	ローラー 塗り	2 4
ロ)不陸調整材	エポキシ樹脂系 (ACパテ)	主剤:硬化剤 = 2 : 1	5 0 0	—	コテ 塗り	2 4
主 材 ・中塗	エポキシ樹脂系 (ACコート中塗り)	主剤:硬化剤 = 1 0 : 1	4 0 0	—	ローラー 塗り	2 4
仕上げ材 ・上塗	ふっ素樹脂系 (ACコート上塗り)	主剤:硬化剤 = 7 : 1	1 5 0	—		—

表 4.3.5 E4 (エポキシ系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下地処理材 イ)プライマー	エポキシ樹脂系 (レジガードEPプライマー)	主剤:硬化剤 = 1 : 1	1 0 0	レジガード [®] Aシンナー (50)	刷毛, ローラー 塗り	2
ロ)不陸調整材	エポキシ樹脂系 (レジガードパテSHグレー)	主剤:硬化剤 = 2 : 1	5 0 0	—	ヘラ 付け	1 6
主 材 ・中塗 1 回目	エポキシ樹脂系 (レジガード#200EH中塗)	主剤:硬化剤 = 9 : 1	3 5 0	レジガード [®] Bシンナー (5)	刷毛, ローラー 塗り	1 6
主 材 ・中塗 2 回目	エポキシ樹脂系 (レジガード#200EH中塗)	主剤:硬化剤 = 9 : 1	3 5 0	レジガード [®] Bシンナー (5)		1 6
仕上げ材 ・上塗	柔軟形ふっ素樹脂系 (レジガードSFクリーン上塗)	主剤:硬化剤 = 8 : 2	1 2 0	V7ロン100H 上塗用シンナー (5)		—

表 4.3.6 E5 (エポキシ系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下地処理材 ・プライマー	エポキシ樹脂系 (HBプライマー)	主剤:硬化剤 = 2 : 1	1 5 0	—	刷毛 塗り	2 4
主材・仕上げ材 ・上塗	エポキシ樹脂系含浸接着剤 (ショーボンドHB)	主剤:硬化剤 = 3 : 1	1 0 0 0	—	ゴムベラ クシメゴテ	塗布 直後
保護フィルム 撤去	ラミネートシート (HBシート) [ふっ素系] 不織布, 3軸ビニロンメッシュ繊維, ふっ素フィルムの3層構造	—	1 枚	—	脱泡ローラー	2 4

表 4.3.7 E6 (エポキシ系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量比)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下地処理材 イ)プライマー	エポキシ樹脂系 (ボンドE810L)	主剤:硬化剤 = 5 : 2	1 0 0	—	刷毛 塗り	2 4
ロ)不陸調整材	エポキシ樹脂系 (ボンドE395)	主剤:硬化剤 = 2 : 1	5 0 0	—	コテ 塗り	2 4
主 材 ・中塗	柔軟型エポキシ樹脂系 (ボンドE480)	主剤:硬化剤 = 5 : 1	2 6 0	—	刷毛 塗り	4 8
仕上げ材 ・上塗	アクリルウレタン系 (ボンドUコートF)	主剤:硬化剤 = 8 : 1	1 2 0	ボンドUコート F うすめ液(10)		—

表 4.3.8 MA1 (変性アクリル系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下地処理材 イ)プライマー	変性アクリル系 (DK550-003)	主剤：硬化剤 ＝１：１	１５０	－	ローラー 塗り	１
ロ)不陸調整材	変性アクリル系 (ダイナライト不陸調整用)	主剤：硬化剤 ＝１：１.４	１０００	－	コテ,ヘラ 塗り	９６
主 材 ・中塗１回目	変性アクリル系 [メタクリル酸メチル] (アクリサーフ)	主剤：硬化剤 ＝１：１	６００	－	ローラー 塗り	４８
主 材 ・中塗２回目	変性アクリル系 [メタクリル酸メチル] (アクリサーフ)	主剤：硬化剤 ＝１：１	６００	－	ローラー 塗り	２４
仕上げ材 ・上塗１回目	ウレタン樹脂系 (CFコートU)	主剤：硬化剤 ＝２：３	２００	－	ローラー 塗り	２４
仕上げ材 ・上塗２回目	ウレタン樹脂系 (CFコートU)	主剤：硬化剤 ＝２：３	２００	－	ローラー 塗り	－

表 4.3.9 MA2 (変性アクリル系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下地処理材 イ)プライマー	変性アクリル系 (DK550-003)	主剤：硬化剤 ＝１：１	１５０	－	ローラー 塗り	１
ロ)不陸調整材	変性アクリル系 (ダイナライト不陸調整用)	主剤：硬化剤 ＝１：１.４	１０００	－	コテ,ヘラ 塗り	７２
主 材 ・中塗１回目	変性アクリル系 [メタクリル酸メチル] (アクリサーフ)	主剤：硬化剤 ＝１：１	６００	－	ローラー 塗り	４８
主 材 ・中塗２回目	変性アクリル系 [メタクリル酸メチル] (アクリサーフ)	主剤：硬化剤 ＝１：１	６００	－	ローラー 塗り	２４
仕上げ材 ・上塗１回目	ふっ素樹脂系 (CFコートF)	主剤：硬化剤 ＝１.３：１	２００	－	ローラー 塗り	２４
仕上げ材 ・上塗２回目	ふっ素樹脂系 (CFコートF)	主剤：硬化剤 ＝１.３：１	２００	－	ローラー 塗り	－

表 4.3.10 R1 (クロロプレンゴム系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下地処理材 イ) 不陸調整材	SBR系ポリアセメントモルタル (セルタルペーストM)	粉体：混和剤 = 5 : 1	3 8 0 0	-	コテ塗り	1 6 8
ロ) プライマー	塩化ゴム系 (オーソレP)	1 液タイプ	1 2 0	-	ローラー, 刷毛塗り	0. 5
主 材 ・ 中塗 1 回目	クロロプレンゴム系 (オーソレNR)	1 液タイプ	2 5 0	-	刷毛塗り	直後
主 材 ・ メッシュ	ビニロン繊維織布 (NSVシート# 8 0 6 0)	-	-	-	ヘラ 押さえ	3
主 材 ・ 中塗 2 回目	クロロプレンゴム系 (オーソレNR)	1 液タイプ	2 5 0	-	ローラー, 刷毛塗り	3
主 材 ・ 中塗 3 回目	クロロプレンゴム系 (オーソレNR)	1 液タイプ	2 5 0	-		1 2
仕上げ材 ・ 上塗 1 回目	クロロスルホン化ポリエチレンゴム系 (オーソレF)	1 液タイプ	2 5 0	-		3
仕上げ材 ・ 上塗 2 回目	クロロスルホン化ポリエチレンゴム系 (オーソレF)	1 液タイプ	2 5 0	-		-

表 4.3.11 R2 (クロロプレンゴム系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下地処理材 プライマー	エポキシ樹脂系 (オーソレQ)	主剤：硬化剤 = 3 : 1	2 0 0	-	ローラー, 刷毛塗り	2 4
主 材 ・ 中塗 1 回目	クロロプレンゴム系 (オーソレNR)	1 液タイプ	2 5 0	-	ローラー, 刷毛塗り	0. 5
主 材 ・ メッシュ	ポリエチレン繊維メッシュ (HPEメッシュ1000)	-	-	-	ヘラ 押さえ	1
主 材 ・ 中塗 2 回目	クロロプレンゴム系 (ONレベラー)	1 液タイプ	1 0 0 0	-	コテ塗り	3
仕上げ材 ・ 上塗	ハルスハイブリッド系 [クロロスルホン化ポリエチレンゴム] (オーソレトップ)	主剤：硬化剤 = 2 : 1	1 5 0	-	ローラー, 刷毛塗り	-

表 4.3.12 U1 (ウレアウレタン系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下地処理材 プライマー	ウレタン系 (ウレタンA)	主剤：硬化剤 ＝2：5	1 5 0	－	刷毛 塗り	1～6
主 材 ・中塗	ウレアウレタン系 (ウレアウレタンA)	主剤：硬化剤 ＝4：5	2 7 5 0	－	吹付け 塗り	0. 5 以上
仕上げ材 ・上塗	アクリルウレタン系 (アクリルウレタンA)	主剤：硬化剤 ＝1：4	2 0 0	－	刷毛 塗り	－

表 4.3.13 C1 (ポリマーセメント系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下塗り	ポリマーセメント系 [アクリルエマルジョン] (ソロシールFX-122)	粉体：エマルジョン ＝10kg：4L	1 7 5 0	－	カップガンで吹付け後、ブラシで擦り込む	10分 以内
仕上げ材 ・上塗	ポリマーセメント系 [アクリルエマルジョン] (ソロシールFX-122)	粉体：エマルジョン ＝10kg：4L	1 7 5 0	－	カップガンで吹付け後、コテで仕上げる	－

表 4.3.14 C2 (ポリマーセメント系) 工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下地処理材 イ)プライマー	アクリル系 (リフレトリート)	1液	2 0 0	－	ローラー 塗り	2
ロ)不陸調整材	ポリマーセメント系 (リフレベースパテ)	主剤：混和剤 ＝13.5：5	5 0 0	－	コテ 塗り	16
主 材 ・中塗1回目	ポリマーセメント系 [アクリルエマルジョン] (リフレベースZ)	主剤：混和剤 ＝15：18	8 0 0	－	ローラー 塗り	4
主 材 ・中塗2回目	ポリマーセメント系 [アクリルエマルジョン] (リフレベースZ)	主剤：混和剤 ＝15：18	8 0 0	－	ローラー 塗り	16
仕上げ材 ・上塗	アクリルシリコン系 (リフレトップカラーSi)	1液	1 6 0	－	ローラー 塗り	－

表 4.3.15 C3（ポリマーセメント系）工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
下地処理材 イ)撥水剤	シラン系 (リフレパセットA)	—	200	水 400	ローラー 塗り	20
ロ)不陸調整材	ポリマーセメント系 (リフレベースパテ)	主剤：混和剤 =13.5：5	500	—	コテ 塗り	2
主 材 ・中塗1回目	ポリマーセメント系 [アクリルエマルジョン] (リフレベースN)	主剤：混和剤 =15：18	600	—	ローラー 塗り	3
主 材 ・中塗2回目	ポリマーセメント系 [アクリルエマルジョン] (リフレベースN)	主剤：混和剤 =15：18	600	—	ローラー 塗り	16
仕上げ材 ・上塗	アクリルシリコン系 (リフレトップカラーSi)	—	160	—	ローラー 塗り	—

表 4.3.16 C4（ポリマーセメント系）工法 塗装仕様

工 程	商品名	混合割合 (質量)	塗布量 (g/m ²)	希釈剤の種類 添加率(%)	施工 方法	塗 布 間隔(h)
主 材 ・中塗1回目	柔軟形ポリマーセメント系仕上げ材 [アクリルエマルジョン] (RF弾性コート)	粉体：混和材 =10：8	900	—	コテ 塗り	18
主 材 ・中塗2回目	柔軟形ポリマーセメント系仕上げ材 [アクリルエマルジョン] (RF弾性コート)	粉体：混和材 =10：8	900	—	コテ 塗り	6
主 材 ・中塗3回目	柔軟形ポリマーセメント系仕上げ材 [アクリルエマルジョン] (RF弾性コート)	粉体：混和材 =10：8	900	—	コテ 塗り	720
仕上げ材 ・上塗1回目	アクリルウレタン系 (RF弾性コートトップコート)	1液	200	—	ローラー 塗り	3
仕上げ材 ・上塗2回目	アクリルウレタン系 (RF弾性コートトップコート)	1液	200	—	ローラー 塗り	—

本章の主材に用いられている材料について、その特徴を以下に述べる。

・エポキシ樹脂系³⁾

エポキシ樹脂材料は、分子中にエポキシ基を2個以上もったエポキシ樹脂と、分子中に活性水素（-NH₂, NH, -CONH-等）を2個以上有した硬化剤との付加重合反応によって、網

目状に反応が成長し、強硬な熱硬化性の硬化樹脂となる。エポキシ樹脂は、ごくわずかな収縮を伴って硬化し、耐久性のある硬化物となる。コンクリート構造物の補修材料として、コンクリートのひび割れ注入や不陸調整、防食塗装やライニング材として使用され、耐薬品性に優れているため、液体の化学品貯蔵タンク内面にも適用されている。しかし一般的に分子中に芳香環をもつため、紫外線に弱く耐候性が低い。被覆材として用いる場合は、ウレタン樹脂やふっ素樹脂等を仕上げ材として塗布し、主材として使用されるエポキシ樹脂を紫外線から守る必要がある。また、硬質のエポキシ樹脂は優れた性能を有しているが、硬く脆い性質があるため、コンクリートのひび割れ等に追従しきれない場合がある。そのため、あえて架橋密度を低くして柔軟性を持たせている柔軟形エポキシ樹脂もある。ただ、架橋密度を低くすると、網目構造中に水や酸・アルカリ分子が侵入しやすくなり、一般的に硬質エポキシ樹脂より耐水性や耐薬品性が劣ることになるため、そのバランスが問題となる。

・変性アクリル系^{3), 4)}

アクリルモノマー以外のスチレン、ビニルトルエン、酢酸ビニルなどのモノマーで変性された共重合体は、熱可塑性および熱硬化性アクリル樹脂の一部として取り扱われている。その中でもメタクリル酸メチルと酢酸ビニルを主成分とする共重合体は、酢ビ・アクリル樹脂と呼ばれ、安価な建築外装用やセメント瓦用塗料として用いられてきた。また、多様な機能化を図る目的でエポキシ樹脂、塩素化ポリオレフィン、あるいはアルキド樹脂やポリエステル樹脂などでグラフト変性したタイプもある。その他のアクリル樹脂としては、加水分解性のアルコキシシラノール基を有するアクリルモノマーを必須成分とした湿気硬化が可能なアクリル・シリコン樹脂、塩基性窒素を有するアクリルモノマーを必須成分とし、架橋剤成分にエポキシ成分を使用するエポキシ硬化型アクリル樹脂、酸化重合機能を持たせたアクリル樹脂など機能面を強調したアクリル樹脂等が上市されている。

コンクリート構造物の防水・躯体保護を目的とした表面保護被覆材として広く使用されている。コンクリート躯体のひび割れに対して優れた追従性能を有する。耐アルカリ性、耐候性、耐オゾン性が良好。

・クロロプレンゴム系

耐候性、耐熱性、耐油性、耐薬品性は天然ゴムよりすぐれている。コンクリート躯体のひび割れに対して優れた追従性能を有する。

・ウレアウレタン系

速硬化の発砲型ウレタン樹脂であり、刷毛やローラーでの塗布が困難なため、被塗物に施工する直前に2液を混ぜ合わせることでできる特殊な吹付塗装機を用いて施工する。一度に厚塗りが可能で、高い伸び性能をもつため、ひび割れ追従性が良好。また、高強度のため、はく落防止等にも適用されている。ウレア樹脂は低分子アミンと低分子のイソシアネート成分の反応で得られ、短時間での硬化を実現しているが、反応性の速さより、機械混合塗布する以外に方法はなく、欠点として、機械の入れない部位への対応等に問題があった。しかし、近年、小型の専用塗装機の開発等により改善されている。

・ポリマーセメント系³⁾

一般的には、セメントモルタルにはスチレンブタジエンゴム（SBR）系ラテックス、エチレン酢酸ビニル（EVA）系樹脂エマルジョンおよびポリアクリル酸エステル（PAE）系樹脂

エマルジョン等がよく使用される。無機系被覆材としては、アクリル系樹脂エマルジョン、PAE系樹脂エマルジョンやエポキシ樹脂系エマルジョン等を使用している。ポリマーの配合量は無機系被覆材の特性を左右し、ポリマーを比較的多く配合することにより劣化因子の遮断性能を向上させるとともに、柔軟性を付与してひび割れ追従性能を向上させる。なお、施工に関しては、通常の有機系材料の場合、水分を嫌うが、この材料はコンクリート躯体に施工する際、あらかじめ施工表面を水分で湿らせて施工する場合が多い。したがって、多湿状態は好ましい条件でもある。

4.4 屋外暴露耐候性試験

屋外暴露耐候性試験は、各メーカーの塗装仕様に従って作製した試験片を、わが国を代表する標準的な暴露場で、本州中部の表日本気候区を代表する暴露試験場である、一般財団法人 日本ウエザリングテストセンター 銚子暴露試験場（北緯：35°43′，東経：140°45′）にて実施している。表 4.4.1 には今回暴露試験を実施した千葉県銚子暴露場に加え、参考として同センターが国内に所有する他の暴露場である沖縄県宮古島および宮古島海岸、北海道旭川暴露場を含めた気象環境因子の基礎データ比較を示す⁵⁾。また、各暴露場での気象環境因子の月別平均値を図 4.4.1 に気温、図 4.4.2 に相対湿度、図 4.4.3 に紫外線量、図 4.4.4 に海塩粒子量を示す⁵⁾。なお、表 4.4.1 に示す海塩粒子量の測定については、JIS Z 2381:2001 大気暴露試験方法通則 表 2 環境因子の測定項目に規定されている「ドライガーゼ法」および「ウェットキャンドル法」の2方法が示されており、いずれの測定方法も JIS Z 2382:1998 大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定に定められた方法で測定されたものである。

表 4.4.1 気象環境因子の地域別比較⁵⁾

項 目		銚 子	宮古島	宮古島海岸	旭 川
平均最高気温 (°C)		18.6	27.1	-	12.0
平均最低気温 (°C)		10.6	21.7	-	2.3
平均気温 (°C)		14.6	24.0	-	7.1
平均相対湿度 (%)		77	78	-	75
平均風速 (m/s)		2.8	4.1	-	2.6
年間降水量 (mm)		1890.1	1817.8	-	1149.7
年間全日射量 (0°,MJ/m ²)		5102.2	5576.3	-	4360.5
年間紫外線量 (0°,MJ/m ²)		283.3	344.2	-	241.8
海塩粒子付着量 (mg NaCl/(m ² ・d))	ドライガーゼ	30.5	49.3	142.3	1.2
	ウェットキャンドル	99.0	102.7	657.0	-
硫黄酸化物付着量 (mgSO ₂ /(m ² ・d))		4.3	2.3	10.6	3.0

(備考) 2001年～2010年(10年間)の平均値

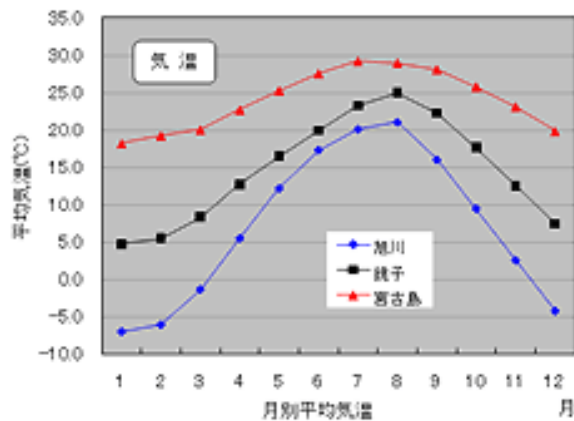


図 4.4.1 月別平均気温⁵⁾

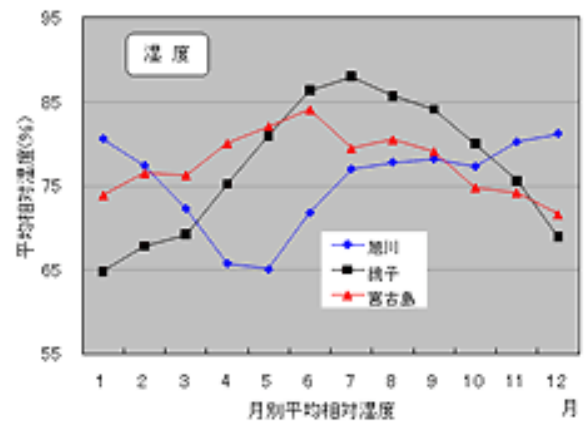


図 4.4.2 月別平均相対湿度⁵⁾

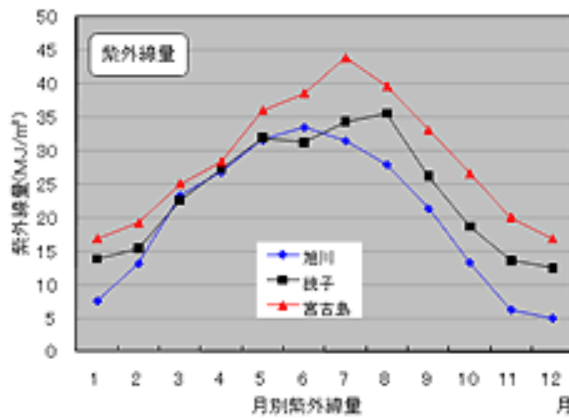


図 4.4.3 月別紫外線量⁵⁾

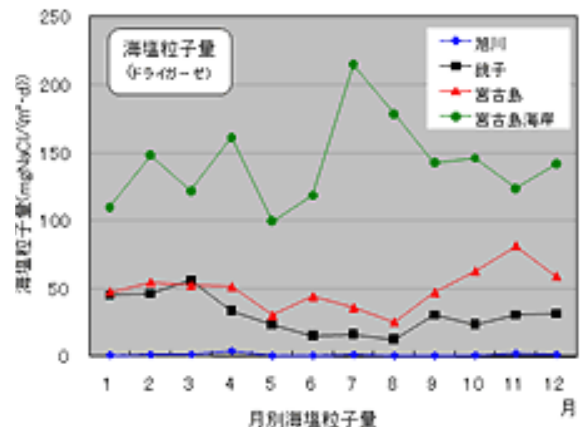


図 4.4.4 月別海塩粒子量⁵⁾

4.5 試験項目

コンクリート基板 (300 mm×150 mm×60mm) に所定の表面被覆材を施したものを供試体として屋外暴露耐候性試験に供し、暴露 1 年・3 年経過毎に供試体を回収し、以下に示す 3 種類の方法によって付着性を評価した。

- ① 付着強度試験 (JSCE-K 531-2010 表面被覆材の付着強さ試験方法 (案))
- ② カッターナイフはく離試験^{6), 8)}
- ③ 見かけのはく離抵抗性試験^{6), 7), 8)}

なお、②および③の試験方法については第 3 章 3.6 節、3.8 節に記載。

4.6 試験結果および考察

付着強度試験、カッターナイフはく離試験および見かけのはく離抵抗性試験の試験結果を以下に示す。

なお、塗膜の外観は、何れの工法においても暴露 3 年後の塗膜には、割れ、膨れ、はがれ等の欠陥は認められず、良好な塗膜状態を維持している。

4.6.1 付着強度試験

初期・暴露1年・暴露3年の付着強度試験結果をエポキシ樹脂系 E1・E2・E3・E4・E5・E6 は図 4.6.1.1 に、変性アクリル系 MA1・MA2, クロロプレンゴム系 R1・R2 およびウレタン系 U1 は図 4.6.1.2 に、ポリマーセメント系 C1・C2・C3・C4 は図 4.6.1.3 に、また、それぞれの破壊箇所を表 4.6.1.1 に示す。

初期の付着強度は、ポリマーセメント系である C3 を除き、多くの機関が基準値として採用している 1.0N/mm^2 を満足している。C3 も暴露期間を経るに従い付着強度は増し、他の工法と同様に問題のない強度となり、既往の研究^{6), 7)}と同様の傾向を示している。

また、破壊箇所(表 4.6.1.1)については、ポリマーセメント系やクロロプレンゴム系の一部を除いては基板破壊を示しており、暴露3年後においても破壊箇所の変化がないものが大半である。なお、初期では塗布材間の界面破断(クロロプレンゴム系)や凝集破壊(ポリマーセメント系)であったものでも、暴露1年後には基板破壊を示していることや、現時点

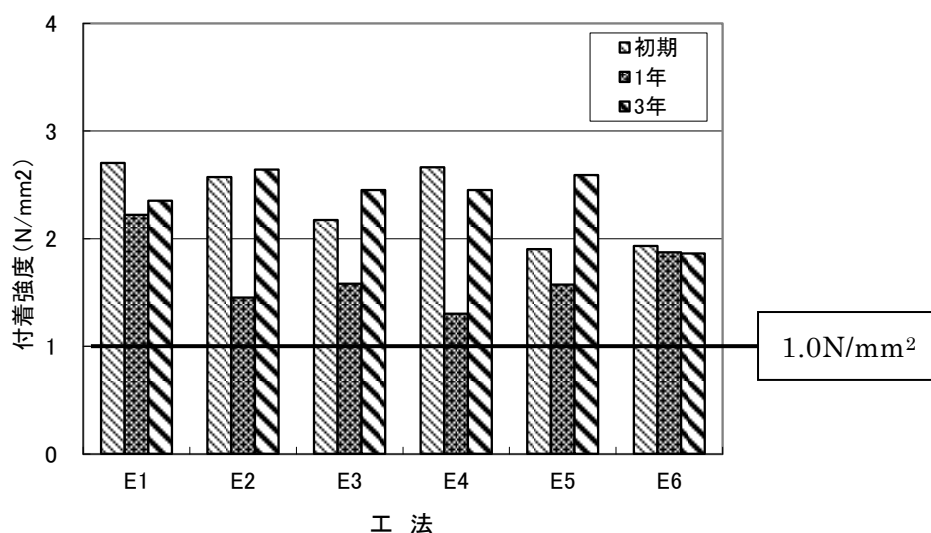


図 4.6.1.1 付着強度経時変化 (E1・E2・E3・E4・E5・E6)

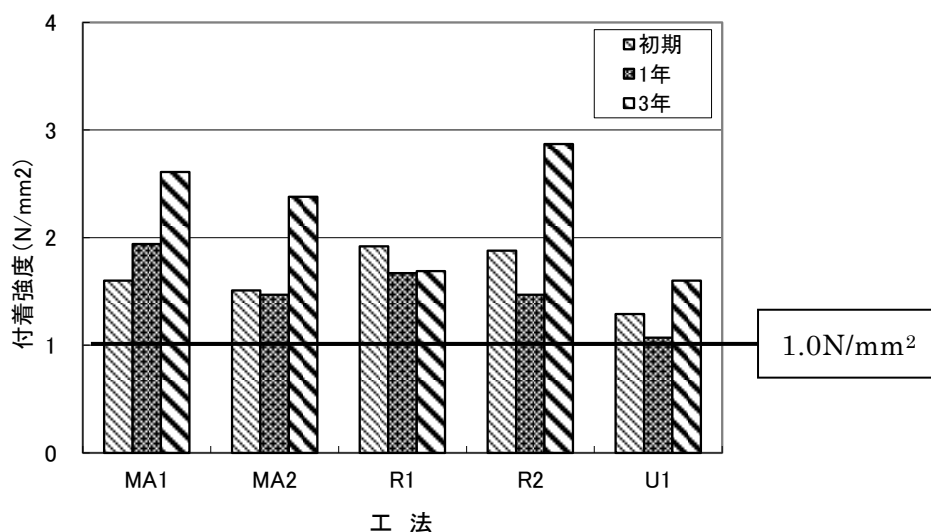


図 4.6.1.2 付着強度経時変化 (MA1・MA2・R1・R2・U1)

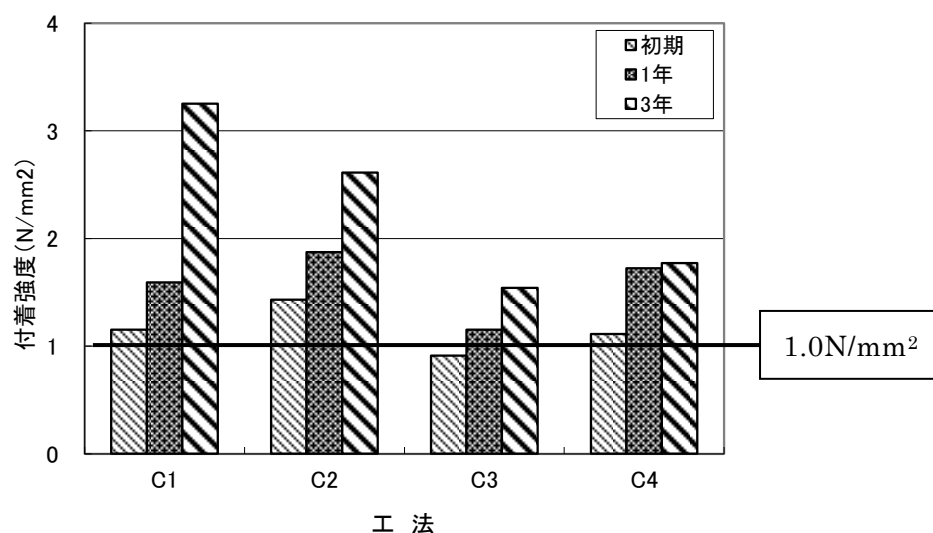


図 4.6.1.3 付着強度経時変化 (C1・C2・C3・C4)

表 4.6.1.1 付着強度試験後の破壊箇所一覧表

工法名	付着強度の破壊箇所		
	初期	1 年	3 年
E1(エポキシ樹脂系+柔軟型ウレタン樹脂系)	A	A	A
E2(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	A	A	A
E3(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	A	A	A
E4(エポキシ樹脂系+柔軟型ふっ素樹脂系)	A	A	A
E5(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	A	A	A
E6(エポキシ樹脂系+アクリルウレタン樹脂系)	A	A	A
MA1(変性アクリル樹脂系+ウレタン樹脂系)	A	A	A
MA2(変性アクリル樹脂系+ふっ素樹脂系)	A	A	A
R1(クロロプレンゴム系+クロロスルホン化ポリエチレンゴム系)	BK	A	A
R2(クロロプレンゴム系+ハルスハイブリッド系)	A	A	A
U1(ウレアウレタン系+アクリルウレタン系)	A	A	A
C1(ポリマーセメント系)	A	A	BG
C2(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	BG	A	A
C3(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	BG	BG	BG
C4(柔軟型ポリマーセメント系+アクリルウレタン系)	A	A	BG

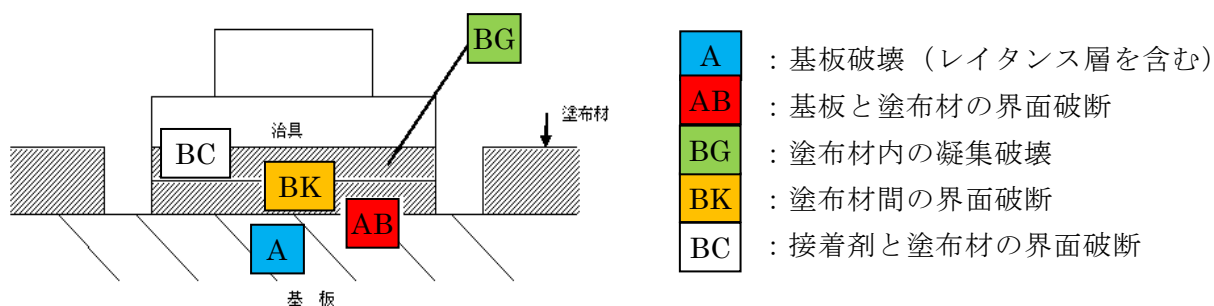


図 4.6.1.4 付着強度試験の破壊箇所の説明

では基板と塗布材間の界面破断を起こしている工法も認められず、まだ劣化傾向にはないようである。なお、図 4.6.1.4 に表 4.6.1.1 の付着強度試験の破壊箇所記号の説明を示す。15 工法のうち初期では 12 工法、暴露 1 年後および暴露 3 年後では 13 工法が、破壊状態として基板破壊を起こしている。

初期・1 年・3 年の試験結果で基板破壊を起こした工法（エポキシ系 E1・E2・E3・E4・E5・E6、変性アクリル系 MA1・MA2、クロロプレンゴム系 R2、ウレアウレタン系 U1 およびポリマーセメント系 C4）について、経年および工法間による差が認められるか、表 4.6.1.2 に示すように統計的に検討を試みたところ、危険率 5%において工法間での変化については、分散比：2.184、境界値：2.348 で有意差は認められなかったが、経年による変化については、分散比：10.624、境界値：3.493 となり、有意差が認められる。基板破壊していても測定値の変化は、経年変化として認識できるが、工法間で考えた場合、その測定値に優劣はつけられず、工法間での比較が困難であることが判明。

表 4.6.1.2 基板破壊を起こした工法に関する分散分析表（付着強度）

変動要因	変 動	自由度	分 散	観測された分散比	F(0.05)
工 法	2.929	10	0.293	2.184	2.348
経 年	2.849	2	1.425	10.624	3.493
誤 差	2.682	20	0.134		
合 計	8.460	32			

一般的に塗膜は経時的に反応が進み強靱な塗膜になっていると考えられるが、破壊状態が基板破壊の場合、塗膜の付着力が保たれている間は基板の強度による付着強度と考えられる。塗布材内での凝集破壊や塗布材間での界面破断であれば、付着強度および破壊状態により工法間での比較検討が可能となる。しかし、基準値は上回っていても基板破壊を示した工法は、基板強度以上を維持していることは明らかであるが、その付着強度は基板の強度に左右される状況であり、付着性の直接比較は困難と考えられる。なお、経年変化として認識できるとしたものの、この変化は基板強度が変化したものであり、塗膜物性としての付着強度変化が認識できたわけではない。

したがって、付着強度試験で基板破壊を起こした場合、工法間での性能比較は困難であり、他の手法による性能比較検討が必要である。

基板界面での付着強度低下は、コンクリート構造物との一体化が望めず、やがては塗膜はく離を起こしやすい状態となり、将来的に遮断性能の低下を招き、徐々に表面被覆工法の役割を果たせなくなることが予想される。今後の暴露調査で破壊箇所の変化に注意を払う必要がある。

4.6.2 カッターナイフはく離試験^{6), 8)}

付着強度試験において、初期・1 年・3 年の試験結果で基板破壊を起こした工法が 11 工法あった。これらの工法の性能比較のため、付着性を別の角度から検討する。

初期・暴露 1 年・暴露 3 年のカッターナイフはく離試験結果をエポキシ系 E1・E2・E3・E4・E5・E6 は図 4.6.2.1 に，変性アクリル系 MA1・MA2，クロロプレンゴム系 R1・R2 およびウレアウレタン系 U1 は図 4.6.2.2 に，ポリマーセメント系 C1・C2・C3・C4 は図 4.6.2.3 に，また，カッターナイフはく離試験評価基準を表 4.6.2.1，それぞれの破壊箇所を表 4.6.2.2 に示す。

表 4.6.2.1 カッターナイフはく離試験評価基準

はく離長さ (mm)	評価	適用
0 (最小) ～2	レベルⅠ	はく離なし，あるいは極めてわずかなはく離
3 ～ 10	レベルⅡ	はく離するが比較的短い長さで停止
11～50 (最大)	レベルⅢ	比較的容易なはく離から全面はく離

表 4.6.2.2 カッターナイフはく離試験後の破壊箇所一覧表

工法名	カッターナイフはく離		
	初期	1 年	3 年
E1(エポキシ樹脂系+柔軟型ウレタン樹脂系)	AB	AB	AB
E2(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	AA	BK	AB
E3(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	AA	AA	AA
E4(エポキシ樹脂系+柔軟型ふっ素樹脂系)	AA	AB	AB
E5(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	AA	AA	AB
E6(エポキシ樹脂系+アクリルウレタン樹脂系)	AA	AA	AA
MA1(変性アクリル樹脂系+ウレタン樹脂系)	AA	AA	AB
MA2(変性アクリル樹脂系+ふっ素樹脂系)	AA	AA	AB
R1(クロロプレンゴム系+クロロスルフォン化ポリエチレンゴム系)	AA	BK	AA
R2(クロロプレンゴム系+ハルスハイブリッド系)	AA	AA	AA
U1(ウレアウレタン系+アクリルウレタン系)	AA	AA	AB
C1(ポリマーセメント系)	—	—	BG
C2(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	—	BG	AA
C3(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	AA	AA	AA
C4(柔軟型ポリマーセメント系+アクリルウレタン系)	—	AA	AA

—：塗膜破断（試験開始時での破断）

AA：基板破壊（レイタンス層を含む）

AB：基板と塗布材間の界面破断

BK：塗布材間の界面破断

BG：塗布材内の凝集破壊

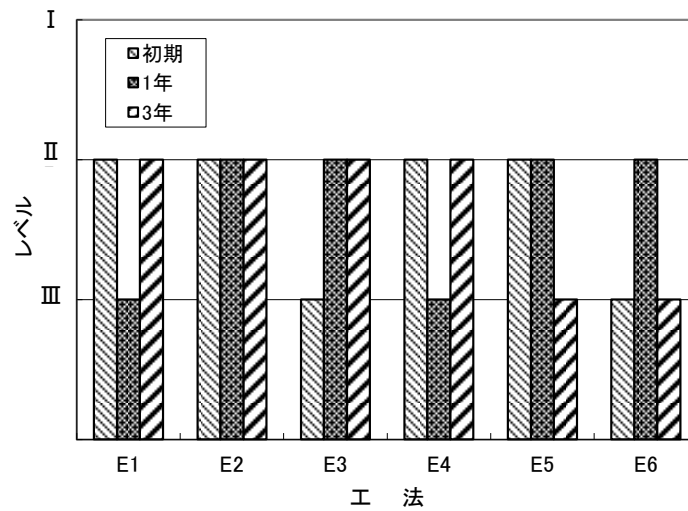


図 4.6.2.1 カッターナイフはく離試験経時変化 (E1・E2・E3・E4・E5・E6)

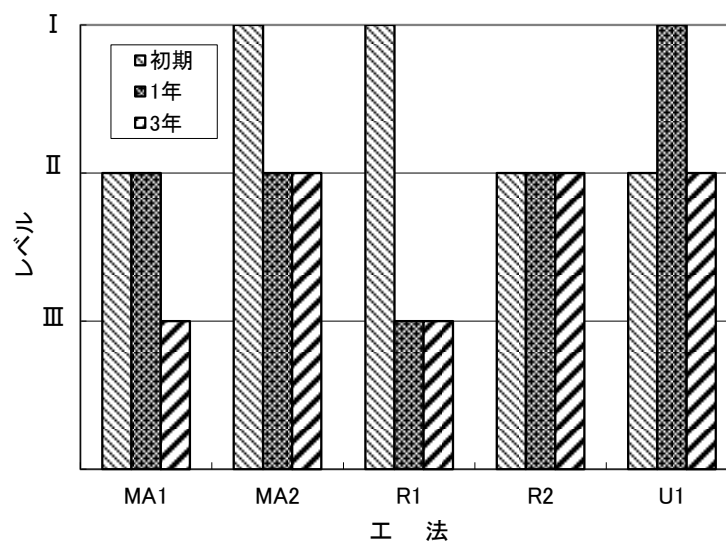


図 4.6.2.2 カッターナイフはく離試験経時変化 (MA1・MA2・R1・R2・U1)

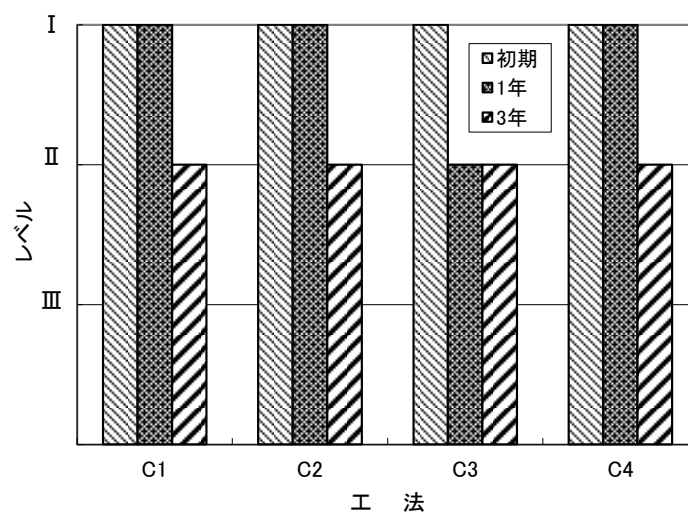


図 4.6.2.3 カッターナイフはく離試験経時変化 (C1・C2・C3・C4)

前項 4.6.1 の付着強度試験では基板破壊のため工法間の性能比較が困難であったエポキシ系 E1～E6，変性アクリル系 MA1，MA2，クロロプレンゴム系 R2，ウレアウレタン系 U1 およびポリマーセメント系 C4 について経年および工法間に差が認められるかを，表 4.6.2.3 に示すように統計的に検討したところ，危険率 5%において工法間では分散比：1.209，境界値：2.348，経年では分散比：1.188，境界値：3.493 となり，いずれにおいても有意差は認められない結果である．ただ，いずれの工法についてもカッターナイフはく離試験後のはがれ箇所が工法間で異なるため，はく離レベルおよびそのはがれ箇所の違いより各工法での性能評価が可能と考え検討を行う．

カッターナイフはく離試験では，基板と塗布材の界面破断（AB）や塗布材間の界面破断（BK）が多く観察された．その多くは初期では基板破壊であったものが暴露 1 年後または暴露 3 年後で基板界面または塗布材間のはく離へと変化し，危険率 5%での分散分析では有意差は認められなかったものの（表 4.6.2.3），はく離箇所の変化を考慮すると工法間での差や経時の劣化傾向をある程度示す結果である（表 4.6.2.2）．この傾向は有機樹脂塗料系の工法（エポキシ系 E1，E2，E4，E5，変性アクリル系 MA1，MA2，クロロプレンゴム系 R1，およびウレアウレタン系 U1）において顕著に検出されているが，ポリマーセメント系の主材を用いる工法（C1，C2，C3，C4）では基板との付着性が良く，基板破壊や凝集破壊を示しやすい傾向が認められている．採用する試験方法によって破壊箇所が異なるものの例として，付着強度試験では基板破壊，カッターナイフはく離試験では基板と塗布材間の界面破断を示した一例を写真 4.6.2.1 に示す．

表 4.6.2.3 付着強度試験で基板破壊を起こした工法の
カッターナイフはく離試験に関する分散分析表

変動要因	変 動	自由度	分 散	観測された分散比	F(0.05)
工 法	870.061	10	87.006	1.209	2.348
経 年	170.970	2	85.485	1.188	3.493
誤 差	1439.03	20	71.952		
合 計	2480.061	32			

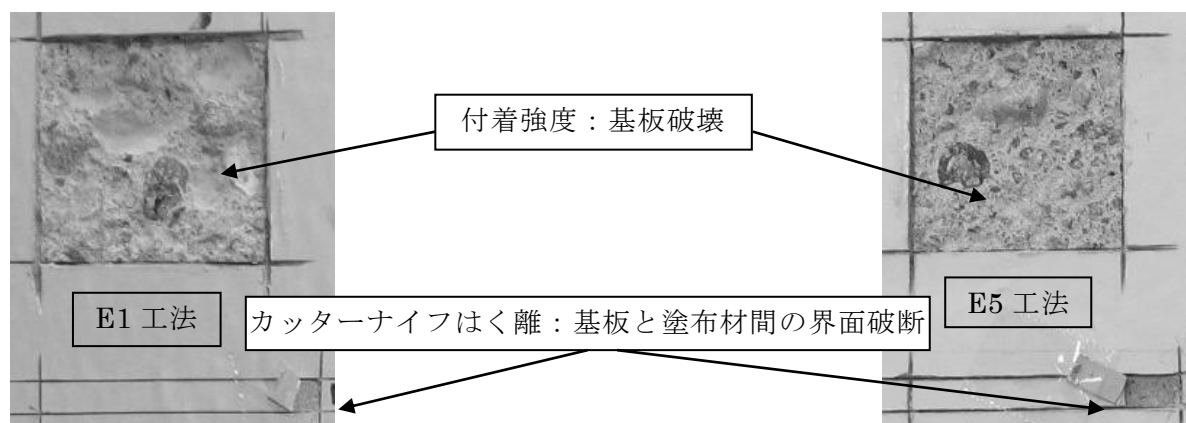


写真 4.6.2.1 付着強度とカッターナイフはく離の破壊状況の一例

一方、カッターナイフはく離試験におけるはく離レベル（図 4.6.2.1～図 4.6.2.3）に着目すると、すべての工法が必ずしも単純な低下傾向を示しているわけではないが、以下の傾向が認められている。

- ① 有機樹脂塗料系工法のうち、エポキシ系（E1, E2, E3, E4, E5, E6）は工法間や経時の顕著な差は認められない。その他の樹脂系（変性アクリル系 MA1, MA2, クロロプレノゴム系 R1, R2 およびウレアウレタン系 U1）では経時の劣化傾向をうかがわせる結果が得られたが、ばらつきも大きく、顕著な差とは言い難い結果である。
- ② ポリマーセメント系（C1, C2, C3, C4）においても、はく離レベルの低下傾向があるものの、基板界面や層間はく離は観察されておらず、工法間や経時による顕著な劣化傾向があるとは言えないものである。

付着強度試験で基板破壊を示した 39 試料のカッターナイフはく離試験での各はく離レベルのヒストグラムを図 4.6.2.4 に示す。カッターナイフで弾く程度ではく離現象を起こし、必ずしも良いとはいえないレベルⅡが 23 試料（59%）存在した。また、比較的是がれやすいレベルⅢが 9 試料（23%）となり、付着強度試験で基板破壊した試料であっても、必ずしも良好といえないものが多く（82%）認められることが判明。また、破壊箇所については、45 試料中、基板破壊 27 試料（60%）、基板と塗布材間の界面破断 10 試料（22%）、塗布材間の界面破断 2 試料（4%）、塗布材内の凝集破壊 2 試料（4%）、塗膜破断 4 試料（9%）であった。

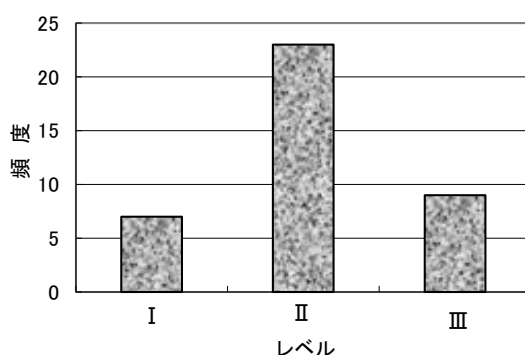


図 4.6.2.4 カッターナイフはく離試験のレベル別頻度

以上より、塗膜のはく離現象を考慮したカッターナイフはく離試験は、実橋脚等の現場で実施可能な簡便な試験の一つで、表面被覆材がはがれを生じる可能性のある箇所を定性的に把握するには有効な手法である。しかしながら、精度や定量性に関しては限界のある手法であることが確認された。

4.6.3 見かけのはく離抵抗性試験^{6), 7), 8)}

先に実施した単軸引張による付着強度試験では、前述の如く大半の工法で 1.0N/mm^2 を上回り、破壊箇所もその殆どが基板破壊を示したため、基板強度以上の付着強度を示しているのは確かであるが、付着性としての比較が困難であった。そこで、塗膜のはく離現象を考慮した、見かけのはく離抵抗性試験を実施することとする。

なお、初期・暴露 1 年・暴露 3 年の見かけのはく離抵抗性試験結果をエポキシ系 E1・E2・E3・E4・E5・E6 は図 4.6.3.1 に、変性アクリル系 MA1・MA2、クロロプレノゴム系 R1・

R2 およびウレアウレタン系 U1 は図 4.6.3.2 に，ポリマーセメント系 C1・C2・C3・C4 は図 4.6.3.3 に，また，それぞれの破壊箇所を表 4.6.3.1 に示す．

カッターナイフはく離試験と同様に，前項 4.6.1 の付着強度試験で基板破壊のため，工法間の性能比較が困難であったエポキシ系 E1～E6，変性アクリル系 MA1，MA2，クロロプレンゴム系 R2，ウレアウレタン系 U1 およびポリマーセメント系 C4 について経年および工法間に差が認められるか統計的に検討することとした．なお，エポキシ系 E3，E6 および変性アクリル系 MA2 については試験前に塗膜破断を起こしているため，E1・E2・E4・E5・MA1・R2・U1・C4 の 8 工法について行う．分散分析表を表 4.6.3.2 に示す．

表 4.6.3.1 見かけのはく離抵抗性試験後の破壊箇所一覧

工法名	見かけのはく離抵抗性 ^{注)}		
	初期	1 年	3 年
E1(エポキシ樹脂系+柔軟型ウレタン樹脂系)	AB	AB	AB
E2(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	BK	BK	BK
E3(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	—	BK	BK
E4(エポキシ樹脂系+柔軟型ふっ素樹脂系)	AB	AB	AB
E5(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	BK	BK	BK
E6(エポキシ樹脂系+アクリルウレタン樹脂系)	—	—	AA
MA1(変性アクリル樹脂系+ウレタン樹脂系)	BK	BK	BK
MA2(変性アクリル樹脂系+ふっ素樹脂系)	BK	—	BK
R1(クロロプレンゴム系+クロロスルホン化ポリエチレンゴム系)	BG	BG	BG
R2(クロロプレンゴム系+ハルスハイブリッド系)	BK	BK	BK
U1(ウレアウレタン系+アクリルウレタン系)	AA	AA	AB
C1(ポリマーセメント系)	—	—	—
C2(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	—	—	AA
C3(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	—	—	AB
C4(柔軟型ポリマーセメント系+アクリルウレタン系)	BK	BK	BK

—：塗膜破断（試験開始時での破断）

AA：基板破壊（レイタンス層を含む）

AB：基板と塗布材間の界面破断

BK：塗布材間の界面破断

BG：塗布材内の凝集破壊

表 4.6.3.2 付着強度試験で基板破壊を起こした工法の
見かけのはく離抵抗性試験に関する分散分析表

変動要因	変 動	自由度	分 散	観測された分散比	F(0.05)
工 法	3979.325	7	568.475	28.729	2.764
経 年	62.838	2	31.419	1.588	3.739
誤 差	277.024	14	19.784		
合 計	4319.187	23			

危険率 5%において工法間では分散比：28.729，境界値：2.764，経年では分散比：1.588，境界値：3.739 となり，経年による有意差は認められなかったが，表 4.6.3.2 にみられるように工法間では有意差が認められる結果が得られている．ただ，いずれの工法についても見かけのはく離抵抗性試験後のはがれ箇所が工法間で異なるため，見かけのはく離抵抗性およびそのはがれ箇所の違いより各工法での性能評価が可能と考え検討を行うこととする．以下に検討結果を示す．

塗膜のはく離現象に着目したこの試験では，初期において 15 工法中 5 工法（エポキシ系 E3，E6 およびポリマーセメント系 C1，C2，C3）が塗膜破断を起こし評価不能であったが，暴露 3 年後では塗膜破断が 1 工法（C1）だけである．経年変化の比較が可能な 10 工法の見かけのはく離抵抗性としては，暴露 3 年後が初期に比べて増加傾向を示しているエポキシ系の E2，E5 を除き，初期に比べて暴露 1 年後が増加し暴露 3 年後で低下しているエポキシ系 E1 およびクロロプレンゴム系 R1，R2 を含め，8 工法（エポキシ系 E1，E4，変性アクリル系 MA1，MA2，クロロプレンゴム系 R1，R2，ウレアウレタン系 U1 およびポリマーセメント系 C4）が低下傾向を示している（図 4.6.3.1～図 4.6.3.3）．

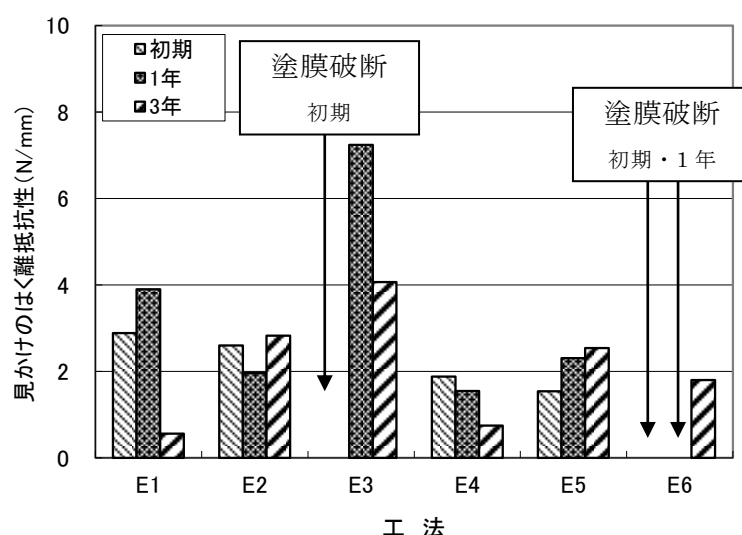


図 4.6.3.1 見かけのはく離抵抗性試験経時変化（E1・E2・E3・E4・E5・E6）

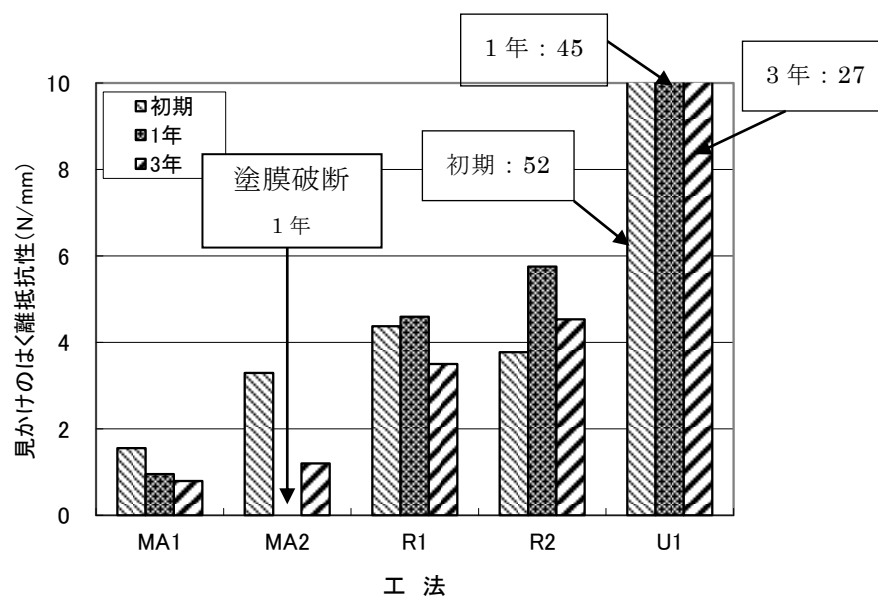


図 4.6.3.2 見かけのはく離抵抗性試験経時変化 (MA1・MA2・R1・R2・U1)

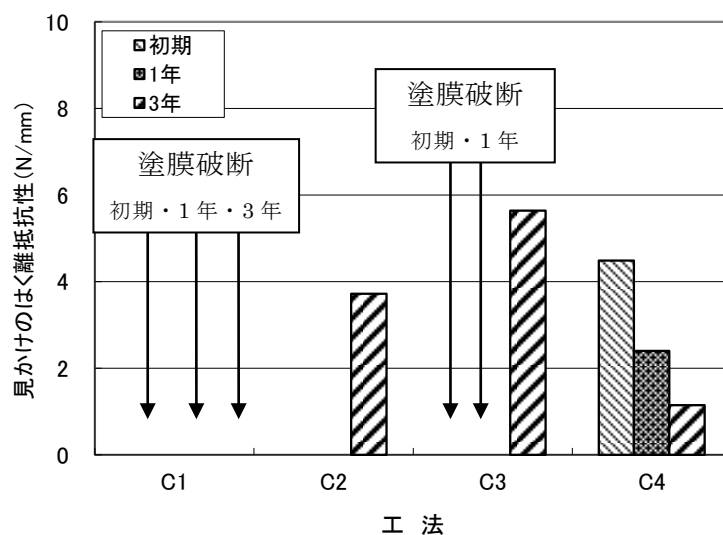


図 4.6.3.3 見かけのはく離抵抗性試験経時変化 (C1・C2・C3・C4)

この見かけのはく離抵抗性は、塗膜をはがす際に生じる仕事量 ($N \cdot mm$) を実際にはく離した面積 (mm^2) で除したものである。このはがす際の仕事量には、塗膜をはがす強度、塗膜自身の引張強度等が含まれており、見かけのはく離抵抗性が高いと塗膜ははがれ難いと判断できる。しかし、鉛直方向での付着力を示す単軸引張による付着強度と同様、はく離状況を把握するために破壊箇所の変化に目を向ける必要がある。大半の工法で破壊箇所 (表 4.6.3.1) について大きな変化はないが、初期から塗膜破断を起こしていたエポキシ系 (E6) が、3 年後には一部レイタンス層を含む基板ではく離を起こしている。なかでも初期で塗膜破断を起こしていた E3 は、暴露 1 年後より塗布材間の界面破断に変わり、暴露 3 年後では見かけのはく離抵抗性も低下傾向を示している。また、ウレアウレタン系 (U1) では、暴露 1 年後までレイタンス層を含む基板ではく離を示していたが、暴露 3 年後では基板と塗布材の界面破断へと移行しており、当初、硬く強固であった塗膜が、徐々にではあるが基板

界面で脆弱部が発生するような変化が起こっているものと考えられる。

初期に塗膜破断が殆どであったポリマーセメント系の一部も同様に、暴露3年後でC2: レイタンス層を含む基板ではなく離、C3: 基板と塗布材の界面破断へとそれぞれ移行しており、基板界面で何らかの変化が起こり始めている。

見かけのはく離抵抗性試験では塗膜の材質により評価できないものもあるが、単軸引張による付着強度で基板破壊を起こした13工法（暴露3年後）については、見かけのはく離抵抗性では11工法が、塗布材内の凝集破壊や塗布材間の界面破断および基板と塗布材の界面破断を示し、工法間での違いが明確になった。塗膜の劣化が進行するにつれ、塗装系として塗膜の弱い箇所の凝集破壊や付着性の良好でない箇所での界面破断に移行している。11工法のうち暴露3年後の見かけのはく離抵抗性が、初期より低下したものが7工法、暴露1年後から低下したものが9工法存在した。付着強度試験で基板破壊を起こし、その特性の違いが明確でなかったものに対し、該当工法のウィークポイント（塗布材のはがれる可能性のある箇所）の把握ができた。また、付着強度試験で基板破壊した工法中、見かけのはく離抵抗性試験で塗膜破断を起こさず試験可能であった8工法（エポキシ系E1・E2・E4・E5、変性アクリル系MA1、クロロプレンゴム系R2、ウレアウレタン系U1およびポリマーセメント系C4）において、危険率5%での分散分析結果で経年での変化に有意差は認められなかったものの、

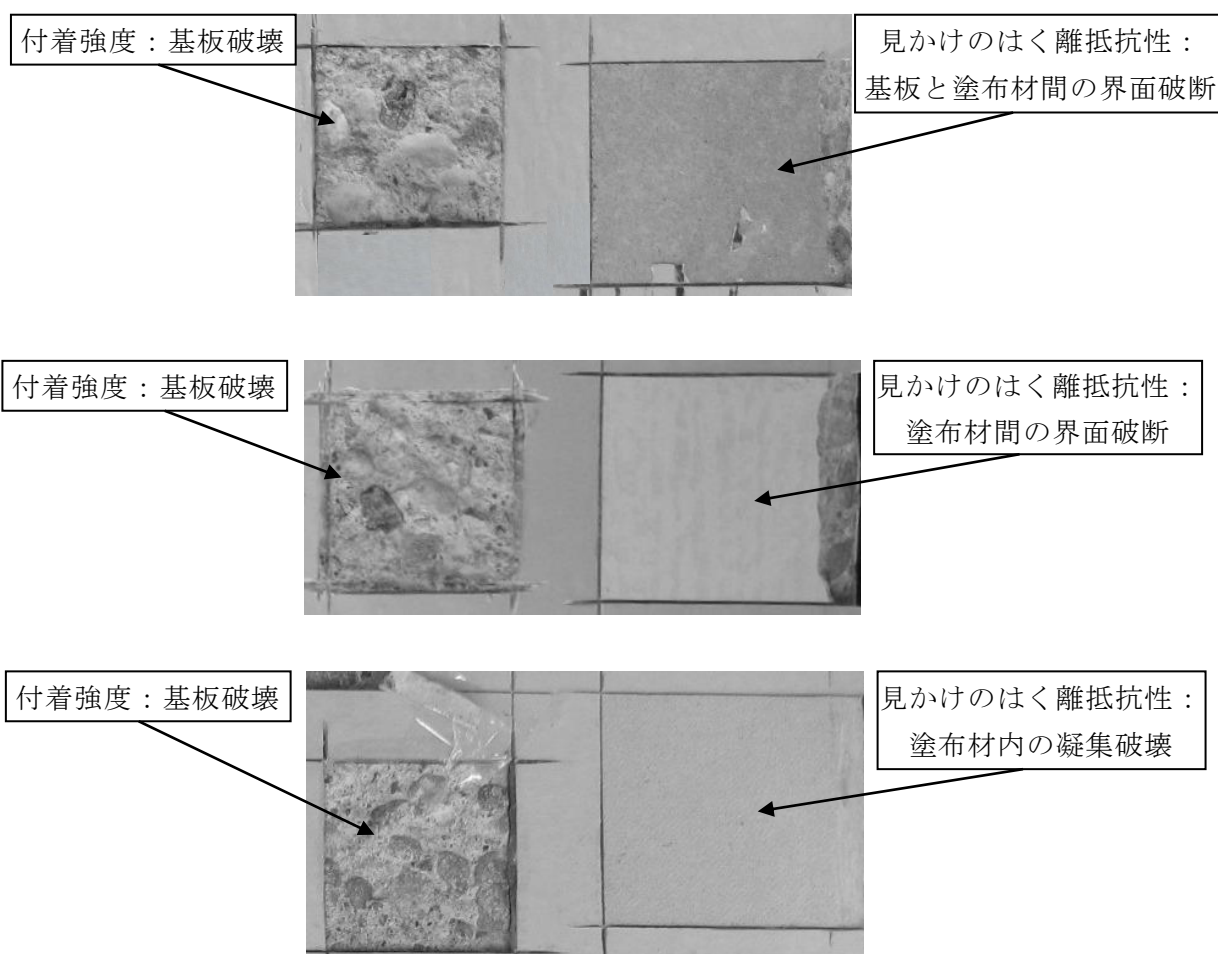


写真 4.6.3.1 付着強度試験と見かけのはく離抵抗性試験の破壊箇所の違い

工法間での有意差は認められており，当初塗膜破断していたものが試験可能となった工法や，3 年目での見かけのはく離抵抗性が極端に低下している工法など，見かけのはく離抵抗性の経年劣化傾向が明らかな工法（エポキシ系 E1・E3・E4・E6，変性アクリル系 MA2，ウレアウレタン系 U1 およびポリマーセメント系 C2・C3・C4）も確認することができた．なお，経年の破壊箇所が同じで見かけのはく離抵抗性が低下傾向を示しているものについても，耐久性の評価が可能であることが確認できた．採用する試験方法によって破壊箇所が異なるものの一例として，付着強度では基板破壊，見かけのはく離抵抗性では基板と塗布材間の界面破断，塗布材間の界面破断および塗布材内の凝集破壊を示した試験体を写真 4.6.3.1 に示す．

4.6.4 試験方法間の相関性

今回，塗膜のはく離現象をイメージしたカッターナイフはく離，見かけのはく離抵抗性，および従来から鉛直方向での付着性を求める手法として実施されている単軸引張による付着強度に関して，付着性評価として採用した三つの試験方法が，どのような関係にあるかを検討するため，試験方法間の相関関係を検討する．付着強度試験とカッターナイフはく離試験に関する散布図を図 4.6.4.1 に，付着強度試験と見かけのはく離抵抗性試験に関する散布図を図 4.6.4.2 および図 4.6.4.3 に，カッターナイフはく離試験と見かけのはく離抵抗性試験に関する散布図を図 4.6.4.4 に示す．なお，見かけのはく離抵抗性試験では，試験時に塗膜破断をおこした工法は数値化できないため除外する．また，図 4.6.4.3 は，見かけのはく離抵抗性が他の工法に比べて極端に高い 3 点（図 4.6.4.2 の○内）の影響も考えられるため，この 3 点を除いた散布図として示したものである．各試験方法間の相関係数を表 4.6.4.1 に示す．

表 4.6.4.1 各試験方法間の相関係数

	付着強度	カッターナイフはく離	見かけのはく離抵抗性
付着強度	—	-0.0578	-0.247
カッターナイフはく離	-0.0578	—	-0.173
見かけのはく離抵抗性	-0.247	-0.173	—

表 4.6.4.1 より，付着強度試験，カッターナイフはく離試験，見かけのはく離抵抗性試験とも強い相関傾向は認められていない．したがって，鉛直方向での単軸引張による付着強度試験と塗膜のはく離現象をイメージしたカッターナイフはく離試験および見かけのはく離抵抗性試験は，それぞれ異なる現象を示しており，既往の研究結果⁵⁾とほぼ同様の傾向を示している．また，同じはく離現象をイメージした定性的手法であるカッターナイフはく離試験と定量的手法である見かけのはく離抵抗性試験についても相関傾向は確認できなかった．

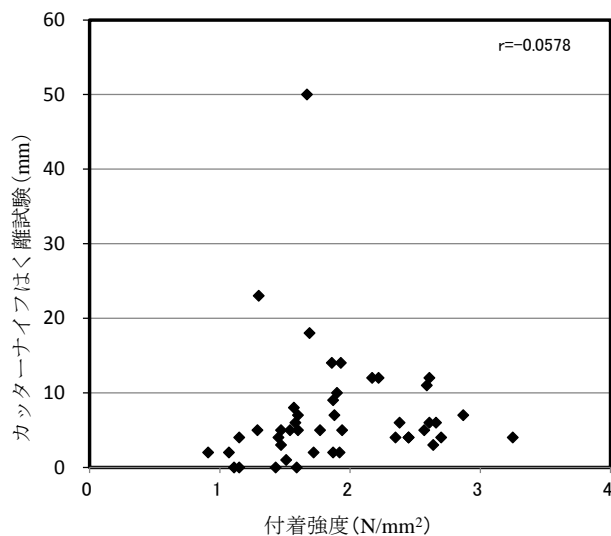


図 4.6.4.1 付着性に関する試験方法間の
相関関係（その 1）

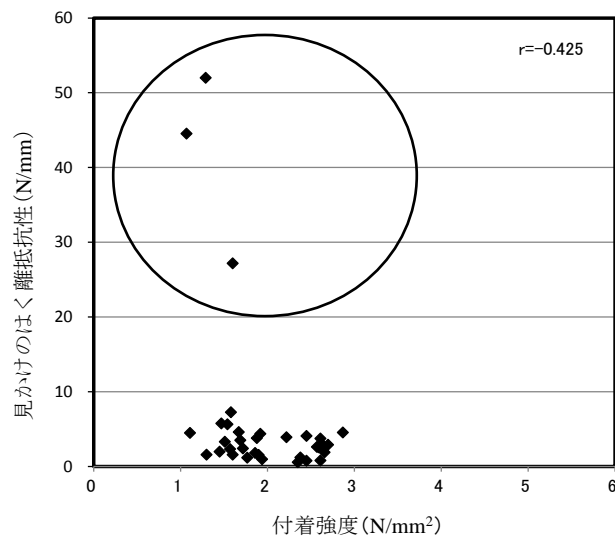


図 4.6.4.2 付着性に関する試験方法間の
相関関係（その 2-1）

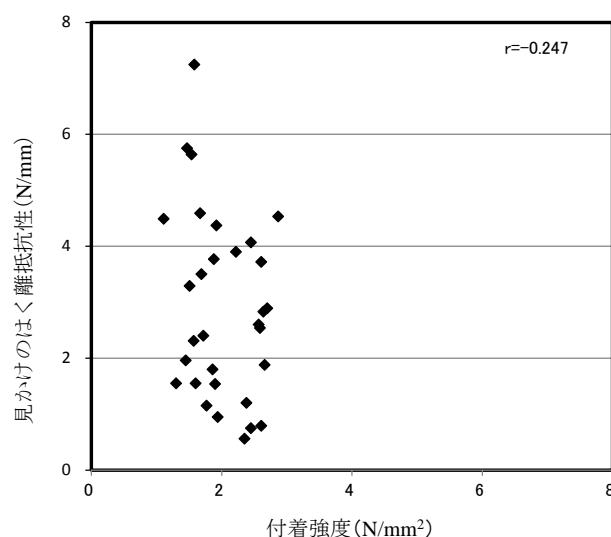


図 4.6.4.3 付着性に関する試験方法間の
相関関係（その 2-2）

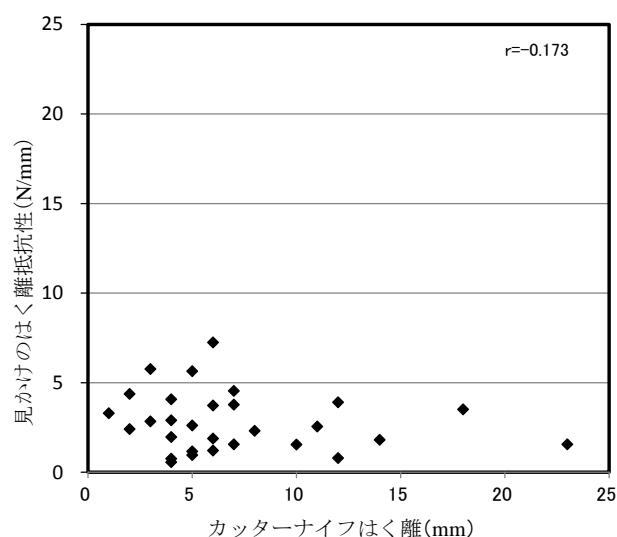


図 4.6.4.4 付着性に関する試験方法間の
相関関係（その 3）

また、付着強度試験で基板破壊以外の破壊形態を示した工法について、各試験方法間での相関関係を図 4.6.4.5 に示す。

付着強度試験とカッターナイフはく離試験については該当工法が 7 工法あるが、相関傾向は認められない。付着強度試験と見かけのはく離抵抗性試験については該当工法が 3 工法しかなく、相関関係の検討は困難である。また、見かけのはく離抵抗性試験とカッターナイフはく離試験については数値的には相関傾向が確認できるものの、該当工法が 3 工法しかなく、その有効性の判断は困難である。

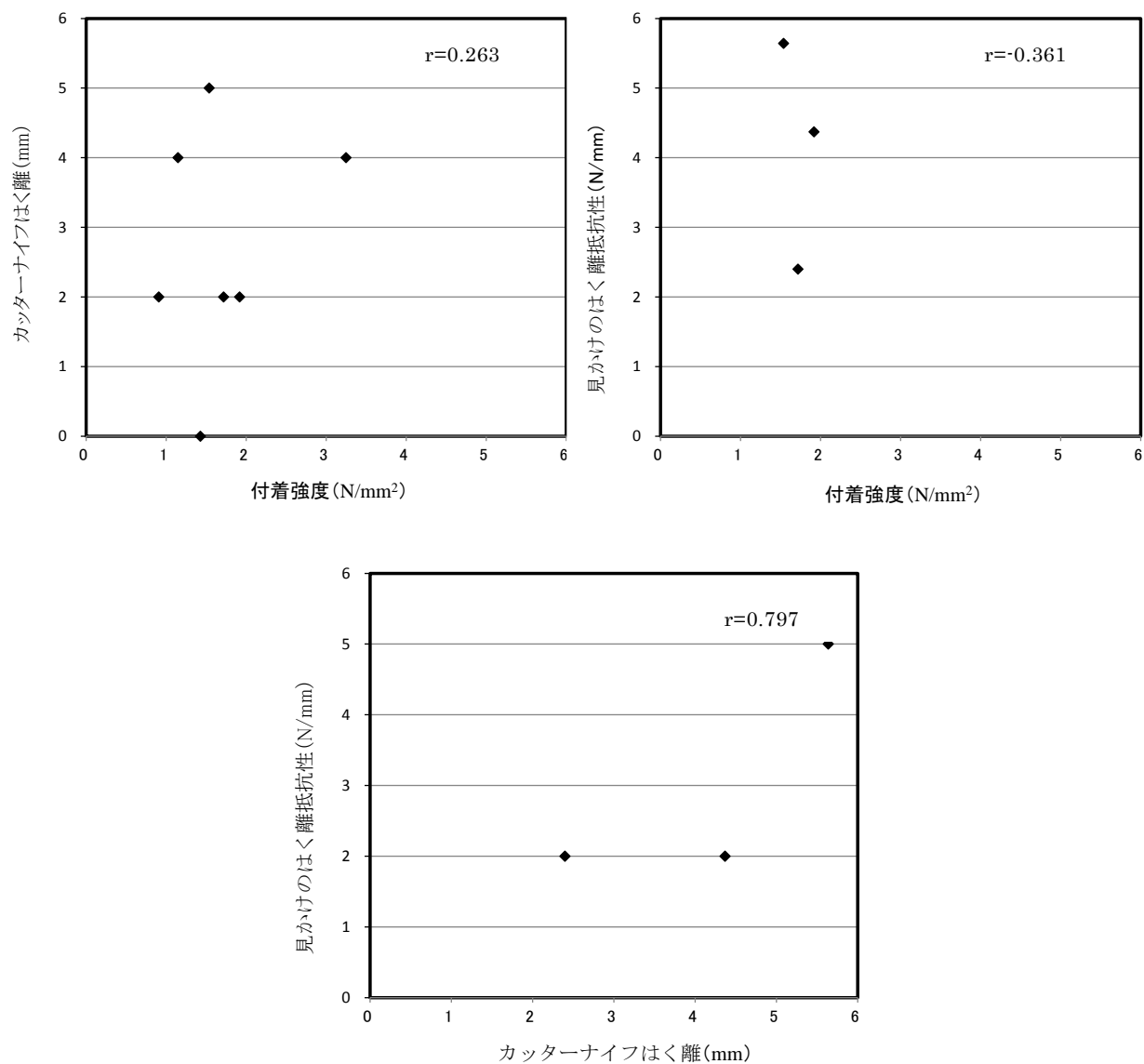


図 4.6.4.5 付着強度試験で基板破壊以外の破壊形態を示した工法の試験方法間の相関関係

以上，付着強度試験で基板破壊以外の破壊形態を示した工法では，相関傾向は明確ではなかった．次項では，散布図を付着強度試験で基板破壊を起こした工法および基板破壊以外の工法の2種類に分類し，試験方法間の関係を検討する．

4.6.5 付着性評価方法の相互関係

図 4.6.4.1, 図 4.6.4.3 および図 4.6.4.4 に示す散布図中, 付着強度試験で基板破壊を示した試料を A: ○, その他の破壊箇所を示した試料を B: ●として, 二方法間の関係を図 4.6.5.1, 図 4.6.5.2 および図 4.6.5.3 に示す.

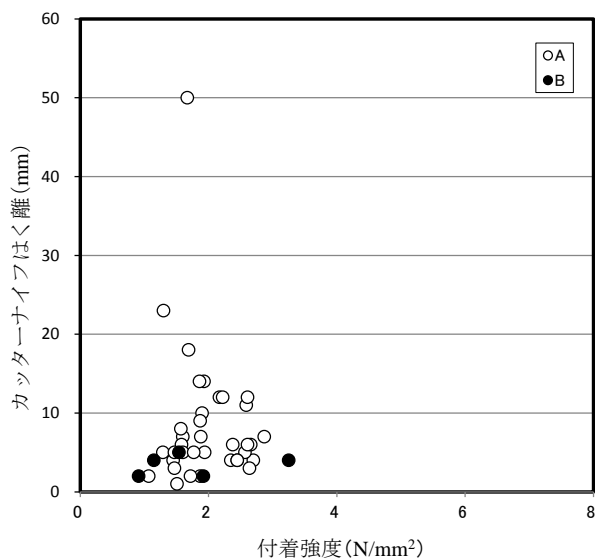


図 4.6.5.1

付着強度とカッターナイフはく離の関係

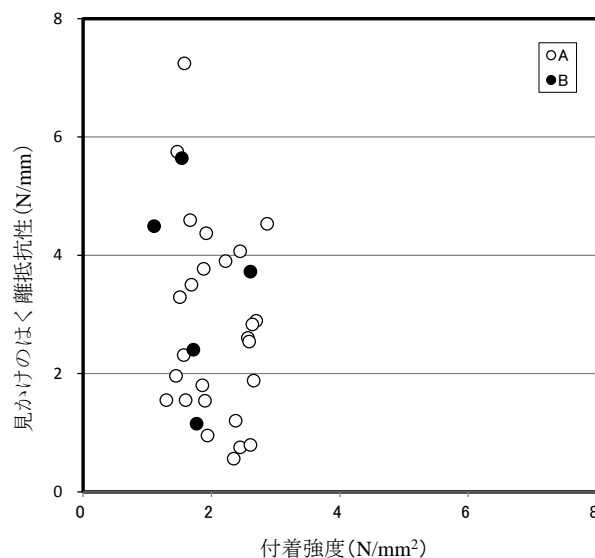


図 4.6.5.2

付着強度と見かけのはく離抵抗性の関係

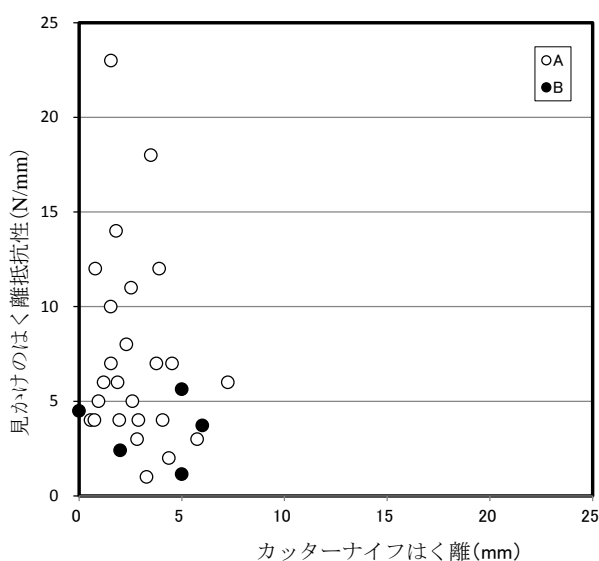


図 4.6.5.3 カッターナイフはく離と
見かけのはく離抵抗性の関係

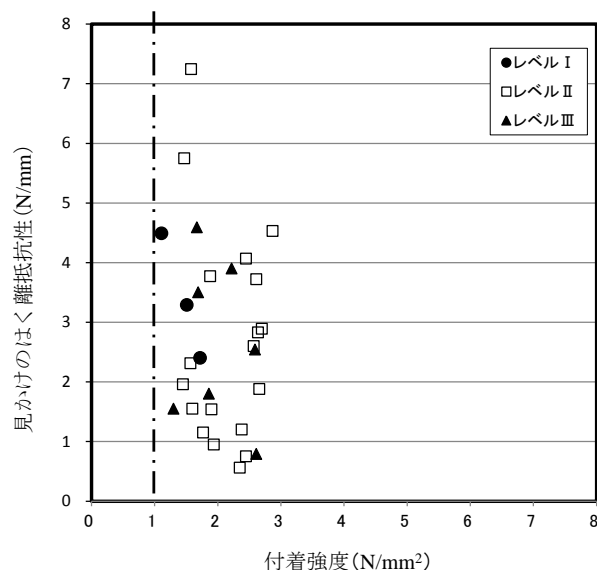


図 4.6.5.4 付着性に関する試験方法間の関係

単軸引張による付着強度試験において基板破壊を起こしている工法 (A: ○) であっても, カッターナイフはく離試験でははく離長さが 10mm を超えるものが多数存在している. また, 見かけのはく離抵抗性試験では付着強度試験に比べて広範囲に分布しており, 塗膜の付着性としての比較が可能と思われる傾向が確認できる.

図 4.6.5.2 に示した散布図は、付着強度試験と見かけのはく離抵抗性試験との関係を示したものであるが、更に付着強度、カッターナイフはく離および見かけのはく離抵抗性の関係を確認するため、この散布図にカッターナイフはく離試験で得られた初期、暴露 1 年後、暴露 3 年後データ（レベルⅠ，Ⅱ，Ⅲ）の分布状態を加味した散布図を図 4.6.5.4 に示す。なお、図 4.6.5.2 同様、見かけのはく離抵抗性試験で塗膜破断をおこした工法は数値化できないため除外する。また、他の工法に比べて極端に高い工法（ウレアウレタン系 U1）についても除外する。付着強度の殆どは 1.0N/mm^2 を大きく上回る領域（ $1\sim 3\text{N/mm}^2$ ）で安定しているが、見かけのはく離抵抗性については、 $0.56\sim 7.24\text{N/mm}$ までの広範囲に分布している（図 4.6.5.4）。また、付着強度の全てが基準値である 1.0N/mm^2 を満足しているが、カッターナイフはく離試験で良好とは言い難いレベルⅡやレベルⅢも多数存在する。

単軸引張での付着強度試験で基板破壊を起こした工法は、その性能値は基板強度に左右されることとなるが、基板強度以上の性能値をもつものの、塗膜そのものの性能値とは考え難い。今回採用したはく離現象を簡易的に把握するカッターナイフはく離試験や、はく離現象を数値化し、定量的に把握することを目的とした見かけのはく離抵抗性では、試験前に破断する塗膜（硬い塗膜やはがれる前に脆性破壊する塗膜）のように測定できないものもある。しかし、塗膜のはく離現象を別の切り口から評価・考察することが可能であり、従来からの単軸引張での付着強度試験に加えて塗装系の脆弱層の特定など、付着挙動をより精度よく評価する一助として有効な手段である。

4.7 まとめ

表面被覆工法に用いられる表面被覆材に関する屋外暴露耐候性 3 年までの付着性能およびその評価手法について、得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 鉛直方向の力に重点を置いた単軸引張による付着強度試験は、その殆どの工法が基板破壊であり、既存の調査結果^{6), 7)}と同様に工法間での性能差を比較することは困難である。
- (2) 付着強度試験で基板破壊のため性能差が明確でない工法のうち、簡易的に塗膜のはく離現象をイメージしたカッターナイフはく離試験により、そのはがれ易さを 3 段階で評価したところ、付着強度試験で基板破壊した工法の性能差を定性的に評価することができた。
- (3) はく離現象を定量的に把握するために採用した見かけのはく離抵抗性試験では、暴露 3 年後において 15 工法中 14 工法ではく離現象が確認することができた。塗膜の材質によっては評価できないものもあるが、単軸引張による付着強度試験で基板破壊を起こしたものが、見かけのはく離抵抗性試験では異なる破壊形態を示したことから、工法間での違いが明確になった。また、経時的に破壊箇所が同じで見かけのはく離抵抗性が低下傾向を示すものについても、耐久性の評価が可能となった。
- (4) 付着強度と見かけのはく離抵抗性の相関関係を検討したところ、試験方法間での相間傾向は低く、既往の研究結果^{6), 7)}と同様の傾向がみられることが判明した。お互い異なる付着性能を評価していることがわかる。
- (5) 付着性能を評価する際、従来の単軸引張による付着強度試験だけでなく、塗膜のはく離現象を考慮したカッターナイフはく離試験や見かけのはく離抵抗性試験を併用することで、これまで付着強度試験で基板破壊のため比較困難であったものが、その違いを評価・考察

する一助となる。

今回、付着強度試験では比較が困難なため、見かけのはく離抵抗性試験から工法間を比較すると、樹脂系の中での差が大きいため一概には言えないが、エポキシ樹脂系およびクロロプレンゴム系が比較的良好な状態であった。ポリマーセメント系については、低下傾向が掴めておらず今後の調査結果を見ていきたい。なお、厚膜であるウレアウレタン系は強靱な塗膜であるが、低下傾向が大きいため今後の調査結果をみることにする。

なお、15 工法の暴露試験は現在も継続中であり、今後も更なるデータを蓄積することで多方面からの検討を重ねるとともに、新たな試験方法として検討中である「見かけのはく離抵抗性試験」についても、信頼性の向上を図っていきたい。また、塗膜が脆く適用し難い材料でも適切に評価できる試験条件の確立に向け努力し、コンクリート補修における表面被覆工法の耐久性およびその評価手法の確立につなげていく必要があると考えている。

[第 4 章 参考文献]

- 1) (社) 土木学会：2005 年制定 コンクリートライブラリー 119 表面保護工法設計施工指針(案)，2005
- 2) 山田 卓司，江口 和雄，濱田 秀則，宮川 豊章：表面保護工を中心としたコンクリート構造物のアップグレード技術の現状と将来展望，4.表面保護工を対象とした各種試験方法と今後の課題と将来展望，材料，Vol.61，No.2，pp203-209，2012.2
- 3) 阪神高速道路公団，日本材料学会：コンクリート構造物表面保護要領 付録Ⅱ：樹脂ノート，1989. 3
- 4) (社) 日本塗料工業会：塗料原料便覧 第 8 版，平成 16 年 5 月 31 日
- 5) 一般財団法人 日本ウエザリングテストセンター，試験場と気象環境因子，
<http://www.jwtc.or.jp/sikenjo/kankyo.html>
- 6) 樫山好幸，吉田幸信，吉田敦，山田卓司，宮川豊章：塗装系防食材の追跡調査に基づく耐久性能評価と付着性能評価手法の提案，コンクリート工学論文集，Vol.14，No.3，pp.11-22，2003.3
- 7) 渡辺 佳彦，荒巻 智，松田 好史，山田 卓司，宮川 豊章：山陽新幹線 RC 高架橋に適用する表面被覆工法の評価方法について，材料，Vol.58，No.8，pp691-696，2009.8
- 8) 山田 卓司，佃 洋一，山本 貴士，国枝 稔，宮川 豊章：表面被覆工法の付着特性に着目した耐久性評価方法に関する研究，材料，Vol.61，No.10，pp.715-720，2012.10

第5章 屋外暴露耐候性試験と促進劣化試験の相関に関する研究

5.1 はじめに

コンクリート構造物の補修事例が多く報告されている昨今，その耐久性が重要課題として挙げられている．コンクリート構造物は，さまざまな劣化要因による劣化の進行を抑制するため，補修が施されている．新しいものを再構築することも一手段であるが，社会情勢からすると，補修を施すことで可能な限り永く美しい状態を保ち，コンクリート構造物の果たす機能を維持することが重要である．近年，補修や予防保全等，表面被覆工法に用いられる表面被覆材も日々改良が行われ，コンクリート構造物を守るための耐久性を有する材料が開発されている．第3章3.4.1項でも述べたように表面被覆工法の耐久性評価は，屋外暴露耐候性試験で評価することが望ましいが，結果を得るまでに長時間を要する．そこで，評価結果を迅速に得ることを目的に劣化を加速させることを意図した，促進耐候性試験に代表される促進劣化試験が多用されている．また，この両者の相関関係を把握することが困難であることも周知のことである．さらに，屋外暴露耐候性試験に比べて劣化傾向が早期につかめる促進試験に頼るあまり，過度な促進条件による促進試験を行うと，実際とは異なる現象が起こることもあるため注意を要する．すなわち，試験方法の改良を重ね，促進耐候性試験により表面被覆工法の耐久性評価を試みているが，長期間を要する屋外暴露耐候性試験に頼らなければならないのが現状である．

以上のことより，促進耐候性試験と屋外暴露耐候性試験の相関性を図るため，多くの機関で両者の関係を把握するための研究が行われている．その一例としては，一般社団法人 日本塗料工業会で行っている，各種塗料別に評価項目ごとの屋外暴露耐候性試験に対する各種促進耐候性試験との相関性を調査した事例がある^{1), 2)}．

5.2 試験概要

本章では，屋外暴露耐候性試験と2種類の促進劣化試験（促進耐候性試験および耐久性サイクル試験）を比較し，その相関を検討する．各塗装仕様に従って作製された試験片を用い，2種類の促進劣化試験を行う．なお，促進劣化試験での劣化状況の評価項目は，表面被覆材の性能として重要なものの一つである付着性について，2種類の試験方法で検討することとし，促進劣化試験の有用性および屋外暴露耐候性試験との関係を検討することとする．

試験に供した工法は，現在，コンクリート構造物の補修や予防保全に適用されている表面被覆工法で，使用している主材の多くを占める

- ① エポキシ樹脂系（柔軟形を含む） 4工法
- ② クロロプレングム系 2工法
- ③ ウレアウレタン系 1工法
- ④ ポリマーセメント系（アクリルエマルジョン）[柔軟形を含む] 3工法

の4種類を選定し，表5.2.1に示す10工法を試験に供する．水セメント比50%，砂セメント比3のモルタルを，内径150mm×70mm×20mmの型枠を用いて成型したモルタル板（日本テストパネル㈱にて一括作製）に，表5.2.1に示す10工法（第4章で用いた15工法のう

ちの 10 工法)を各工法によって推奨されている所定の施工方法に従って施したものを試験片として試験に供する。

表 5.2.1 試験に供した表面被覆工法一覧

工法	主材[膜厚：μm]	仕上げ材（上塗材）[膜厚：μm]
E1	エポキシ樹脂系（160μm）	柔軟形ウレタン樹脂系（30μm）
E4	エポキシ樹脂系（320μm）	柔軟形ふっ素樹脂系（30μm）
E5	エポキシ樹脂系（1000μm）	ふっ素樹脂系（38μm）
E6	柔軟形エポキシ樹脂系（200μm）	アクリルウレタン系（30μm）
R1	クロロプレンゴム系（265μm）	クロロスルホン化ポリエチレンゴム系（70μm）
R2	クロロプレンゴム系（465μm）	ハルスハイブリッド系（60μm） [クロロスルホン化ポリエチレンゴム]
U1	ウレアウレタン系（2250μm）	アクリルウレタン系（80μm）
C1	ポリマーセメント系（465μm） [アクリルエマルジョン]	ポリマーセメント系（1050μm） [アクリルエマルジョン]
C2	ポリマーセメント系（660μm） [アクリルエマルジョン]	アクリルシリコン系（75μm）
C3	ポリマーセメント系（660μm） [アクリルエマルジョン]	アクリルシリコン系（75μm）

5.3 促進劣化試験

今回促進劣化試験方法としては、下記 2 種類の試験方法を採用する。

- (a) 促進耐候性試験
- (b) 耐久性サイクル試験

5.3.1 促進耐候性試験

促進耐候性試験は、屋外暴露耐候性試験で得られる高分子材料等の変化を、人工光源の照射および水噴霧（または水噴霧なし）により、一定の割合で劣化状況を加速する試験方法として、従来から日本工業規格や土木学会規準等、多くの機関が塗膜に関する劣化状況把握を目的として採用されている。

使用する光源によって

- (a) 紫外線アーク灯式耐候性試験（JIS B 7752）
- (b) サンシャインカーボンアーク灯式耐候性試験（JIS B 7753）
（国際的にはオープンフレームカーボンアークランプ式耐候性試験）
- (c) キセノンアークランプ式耐候性試験（JIS B 7754）

等がある。図 5.3.1.1 に太陽光および各種光源の分光分布³⁾の例を示す。

促進耐候性試験の歴史は古く、紫外線アーク灯式耐候試験機に使用される紫外線カーボン

が登場したのは1919年であり、安定性や寿命等さまざまな問題をクリアするため改良を重ね現在に至っている。その後、1940年にサンシャインカーボンアーク灯式耐候試験機がFederal specification, TT-P-54a(July 27)Paint. Phosphorescent ready mixed として規格化された前後より発展してきた⁴⁾。キセノンランプは1898年英国の化学者ラムゼーとトラバースの発明によるものであり、1953年CIE（国際照明委員会）特集号で照明用としてであるが、“キセノン高圧ランプの特徴は高い分光光線の照明がでることである。オスラムキセノン高圧ランプを使用しながら、測光、分光測定、輻射測定、測色および色合わせの分野で測定を行うにあたり、キセノンランプが適当かどうかに関連して、その性能と分光上、測光上の性質が研究されている”と解説されている⁴⁾。

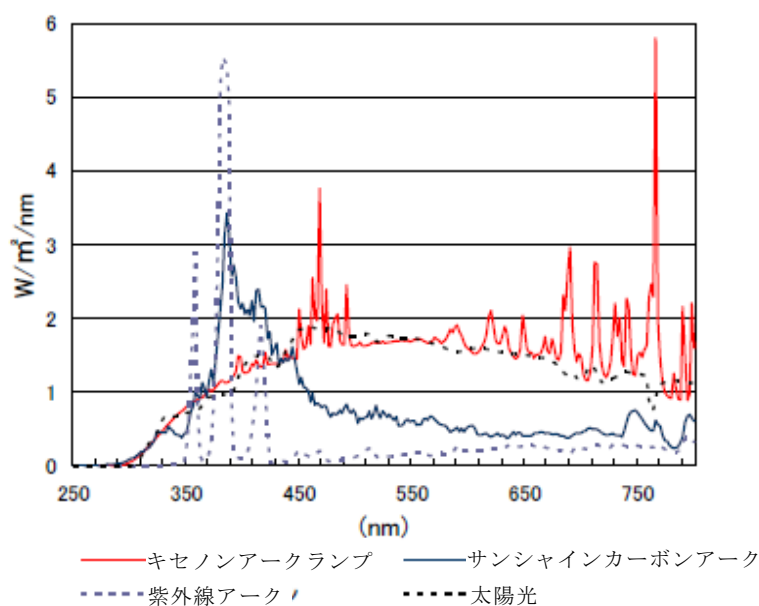


図 5.3.1.1 各種光源の分光分布の例³⁾

上記3種類の促進耐候試験機で、紫外線アーク灯式は1950年代より繊維、包装材料を中心に拡がり工業用塗料分野でも使用されるようになったが、図 5.3.1.1 に示すようにその分光放射は、386nm, 358nm および 415nm をピークとする紫外線領域に偏ったものであった。この分光分布は太陽光放射とは大きく異なるため、屋外暴露試験との相関性に問題があった⁵⁾。その後、波長分布が広く長波長域にも放射光帯を有し、太陽光放射に近いサンシャインカーボンアーク灯式耐候試験機が主流となり、JIS K 5400 塗料一般試験方法にも採用された。また、1990年のJIS K 5400 塗料一般試験方法の改訂では、より太陽光に近い分光分布を示すキセノンアーク灯式耐候試験機⁶⁾がサンシャインカーボンアーク灯式耐候試験機とともに規格化された。しかし、日本工業規格のISO化や世界貿易機関／貿易の技術的障害に関する協定(WTO/TBT Agreement)の影響もあり、1999年に塗料一般試験方法としてのJIS K 5400が廃止となった。新たにJIS K 5600 塗料一般試験方法が制定される際、サンシャインカーボンアーク灯式耐候試験機が削除され、促進耐候試験機としてはより太陽光に近い分光分布を示すキセノンアーク灯式耐候試験機のみが採用されることとなった。ただ、塗料分野では削除されているが、他分野では残っていること、歴史的にサンシャインカーボンアーク灯式

耐候性試験機でのデータ蓄積が多いこと、JIS K 5400 が「塗料一般試験方法」として根付いていたこともあり、JIS K 5400 が廃止された後も引き続き採用されている場合もある。

上記の状況を踏まえ、今回、促進劣化試験として採用する促進耐候性試験は、ほぼ太陽光に近似した分光特性によって、屋外での暴露試験条件に近い劣化形態を示す可能性が高く、相関性も期待できるキセノンアークによる促進耐候性試験とする。なお、試験方法は、JIS K 5600-7-7：1999 塗料一般試験方法 第7部：塗膜の長期耐久性-第7節：促進耐候性（キセノンランプ法）に従い、3000 時間の照射を行う。なお、試験条件は、塗料関係の製品規格である JIS K 5658 建築用耐候性上塗り塗料、JIS K 5659 鋼構造物用耐候性塗料、JIS A 6909 建築用仕上塗材の促進耐候性試験で採用されている JIS K 5600-7-7：1999 に示すサイクル A（ぬれ時間：120 分中 18 分、乾燥期間中の相対湿度：40～60%）とする。試験に用いたキセノンアーク灯式耐候試験機を写真 5.3.1.1 および図 5.3.1.2 に示す。

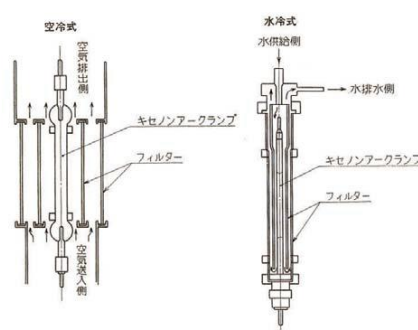


図 5.3.1.2 キセノンアークランプの構造図

写真 5.3.1.1 キセノンアーク灯式耐候試験機

5.3.2 耐久性サイクル試験

キセノン照射による促進耐候性試験は、主に塗膜の外観、色、光沢および白亜化等の低下傾向を把握するのに用いられているが、コンクリート構造物に対する表面被覆工法として用いられている厚膜形の表面被覆材では、付着性の低下傾向を掴み難いものと考えられる。そこで今回、JIS A 6909：2003 追補 1：2006 追補 2：210 建築用仕上塗材および JIS A 6916：2000 追補 1：2006 建築用下地調整塗材の耐久性を評価する項目として採用されている湿潤状態、低温状態、高温状態を一定サイクル繰り返す耐久性試験（湿潤冷熱繰り返し）に、上述 5.3.1 項で採用したキセノンランプによる促進耐候性試験を組み合わせることで、複合的な劣化を想定した耐久性サイクル試験を行う。

試験条件を以下に示す。

①キセノンランプによる促進耐候性試験 72 時間

↓

②水中に 18 時間浸せき（浸せき層を設置した室内環境：23±2℃，50±5%）←

↓

③-20℃で 3 時間静置（恒温槽設置の室内環境：設定なし）

↓

④50℃で 3 時間静置（恒温槽設置の室内環境：設定なし）←

24 時間

①の促進耐候性試験を 72 時間実施した後、②～④の湿潤冷熱繰り返し試験を 4 回繰り返し、
たものを 1 サイクル（168 時間）とし、合計 10 サイクル（1680 時間）行う。

5.3.3 付着性評価試験

5.3.1 項および 5.3.2 項で示した促進劣化試験終了後、以下に示す 2 種類の項目について
付着性を評価する。

① 付着強度試験（JSCE-K 531-2010 表面被覆材の付着強さ試験方法（案））

② 見かけのはく離抵抗性試験^{7), 8), 9)}

なお、試験方法は第 3 章 3.8 節に記載。

5.3.4 試験結果および考察

各促進劣化試験後の付着強度および見かけのはく離抵抗性の試験結果を以下に示す。

(1) 促進耐候性試験

JIS K 56007-7：1999 のサイクル A にて促進耐候性試験 3000 時間終了後、(a)付着強度試験
および(b)見かけのはく離抵抗性試験を実施した結果を以下に述べる。

(a) 付着強度試験

初期および促進耐候性試験キセノン 3000 時間後の付着強度結果として、図 5.3.4.1 にエ
ポキシ系 E1・E4・E5・E6、図 5.3.4.2 にクロップレンゴム系 R1・R2 およびウレアウレタ
ン系 U1、図 5.3.4.3 にポリマーセメント系 C1・C2・C3、各破壊箇所を表 5.3.4.1 に、そ
の破壊箇所の説明を図 5.3.4.4 に示す。

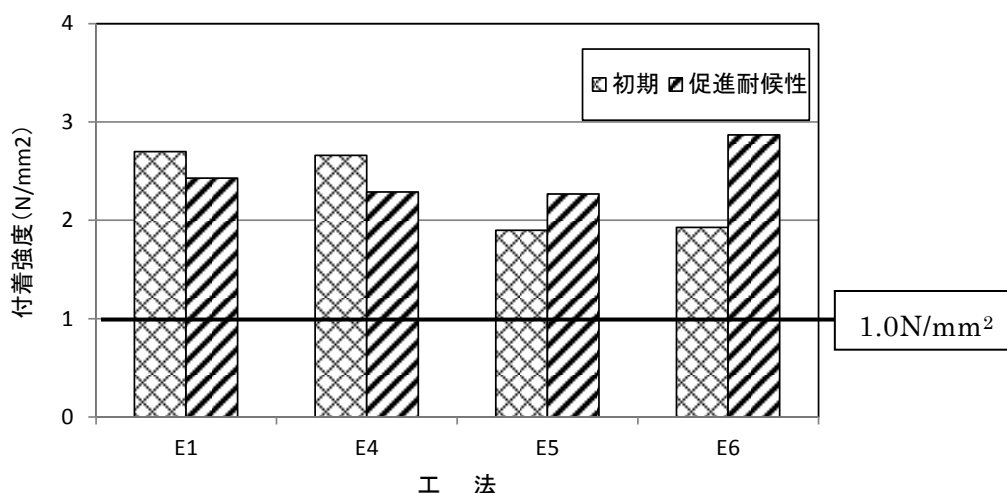


図 5.3.4.1 付着強度経時変化（E1・E4・E5・E6）

促進耐候性試験後の付着強度は、多くの機関が基準値として採用している 1.0N/mm^2 を上
回る結果となった。図 5.3.4.1～図 5.3.4.3 に示すように、促進耐候性試験後の付着強度は、
10 工法中 8 工法が初期値より強度を増す結果となった。なお、初期値を下回ったエポキシ系

の E1・E4 については、付着強度は減少しているが、表 5.3.4.1 からわかるように、何れも破壊箇所が基板破壊のため、第 4 章 4.6.1 項での検討と同様、塗膜劣化による付着強度低下とは言い難い結果である。そこで促進耐候性試験後に基板破壊を起こした工法（エポキシ系 E1・E4・E5・E6 およびクロプレングム系 R1・R2）について、試験条件および工法間による差が認められるかを統計的に検討した結果を表 5.3.4.2 に示す。危険率 5% で工法間については、分散比：0.450，境界値：5.050 で有意差は認められず，初期値と促進耐候性試験後についても，分散比：2.093，境界値：6.607 で有意差は認められない。

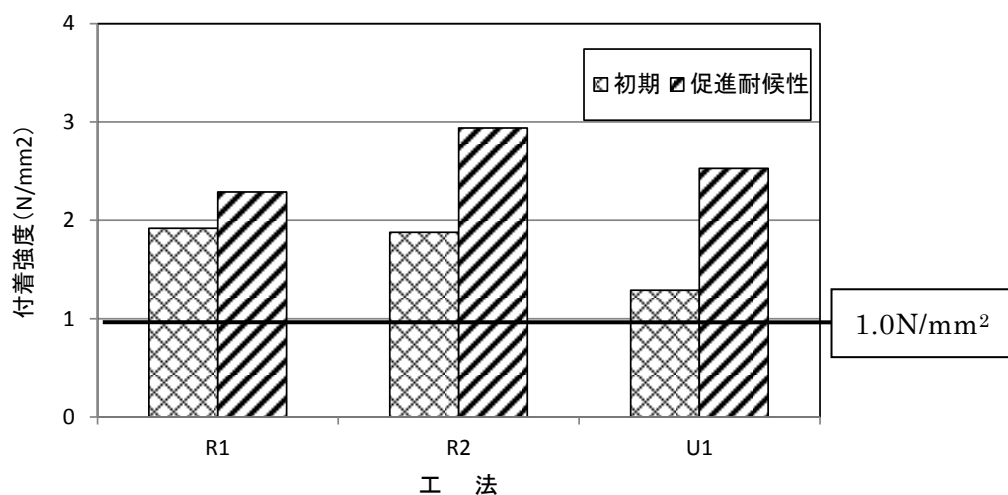


図 5.3.4.2 付着強度経時変化 (R1・R2・U1)

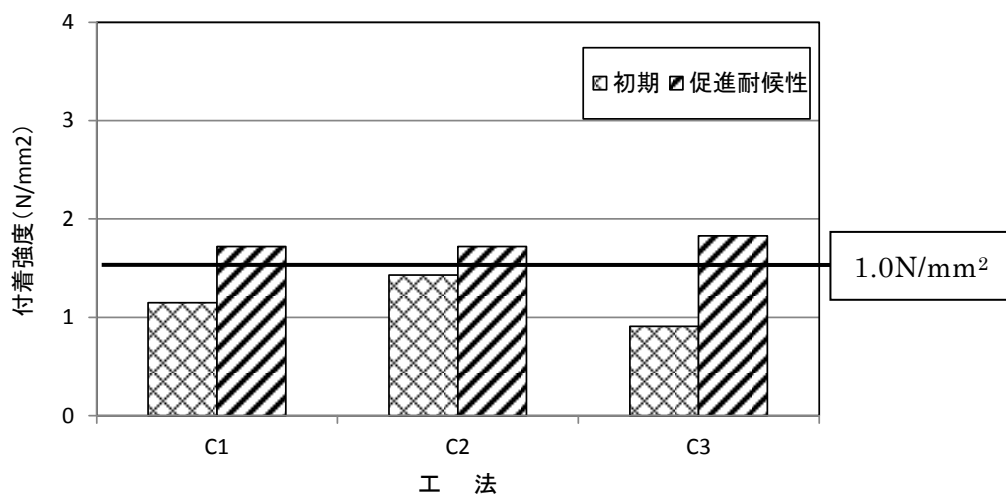


図 5.3.4.3 付着強度経時変化 (C1・C2・C3)

表 5.3.4.1 付着強度試験後の破壊箇所一覧表

工 法	付着強度の破壊箇所	
	初期	促進耐候性試験キセノン 3000 時間
E1(エポキシ樹脂系+柔軟型ウレタン樹脂系)	A	A
E4(エポキシ樹脂系+柔軟型ふっ素樹脂系)	A	A
E5(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	A	A
E6(エポキシ樹脂系+アクリルウレタン樹脂系)	A	A
R1(クロロプレンゴム系+クロロスルホン化ポリエチレンゴム系)	BK	A
R2(クロロプレンゴム系+ハルスハイブリッド系)	A	A
U1(ウレアウレタン系+アクリルウレタン系)	A	BK
C1(ポリマーセメント系)	A	BG
C2(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	BG	BG
C3(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	BG	BG

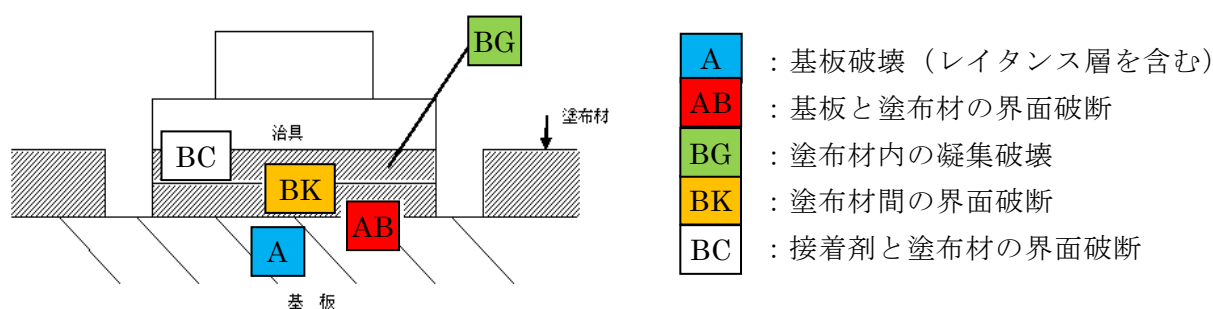


図 5.3.4.4 付着強度試験の破壊箇所の説明

表 5.3.4.2 基板破壊を起こした工法に関する分散分析表

変動要因	変 動	自由度	分 散	観測された分散比	F (0.05)
工 法	0.395	5	0.079	0.450	5.050
試験条件	0.367	1	0.367	2.093	6.607
誤 差	0.877	5	0.175		
合 計	1.640	11			

基板破壊を起こしているエポキシ系 E1・E4・E5・E6 およびクロロプレンゴム系 R1・R2 は、塗膜の付着力が保たれている間、付着強度が基板そのものの強度に左右されると考えられる。すなわち、塗布材内での凝集破壊や塗布材間の界面破断であれば、付着強度および破壊状態により工法間での比較検討が可能となる。しかし、初期値を下回っても基板破壊を示す工法は、付着強度としては基板強度以上を維持していることとなり、付着性能の直接比較は困難となる。逆に、初期に基板破壊を示し、促進耐候性試験後に基板破壊以外の破壊形態を示したウレアウレタン系 U1 およびポリマーセメント系 C1 については、付着強度はまだ十分維持しているが、破壊箇所が塗布材間の界面破断や塗布材内での凝集破壊に変化している

ことより、塗膜の劣化傾向がうかがえる。ただし、劣化傾向を確認するためには更なる促進耐候性試験が必要である。

以上より、3000 時間までのキセノンアーク灯による促進耐候性試験では、付着強度の顕著な劣化傾向は確認できない。

(b) 見かけのはく離抵抗性試験

初期および促進耐候試験後の見かけのはく離抵抗性試験結果として、図 5.3.4.5 にエポキシ系 E1・E4・E5・E6、図 5.3.4.6 にクロプレンゴム系 R1・R2 およびウレアウレタン系 U1、図 5.3.4.7 にポリマーセメント系 C1・C2・C3、各はく離箇所を表 5.3.4.3 に示す。

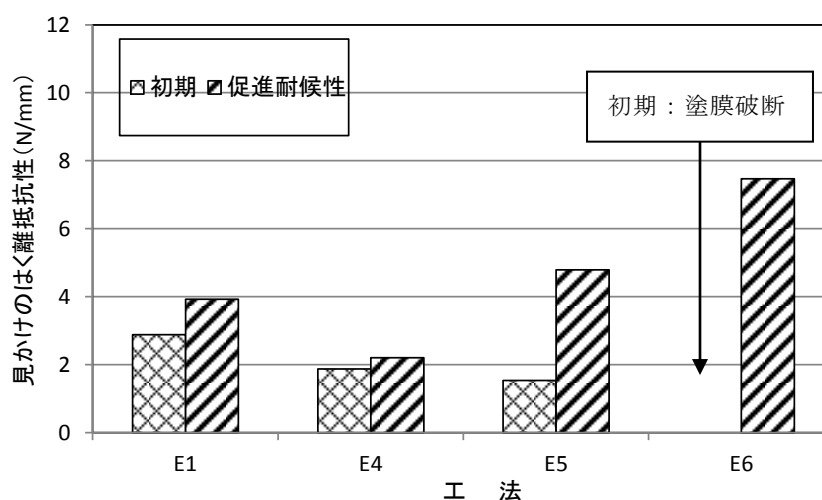


図 5.3.4.5 見かけのはく離抵抗性経時変化 (E1・E4・E5・E6)

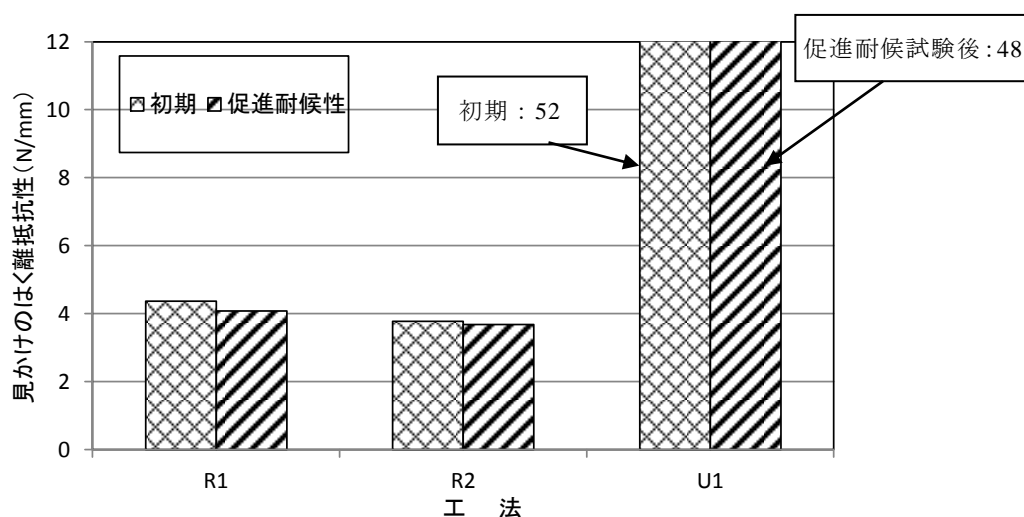


図 5.3.4.6 見かけのはく離抵抗性経時変化 (R1・R2・U1)

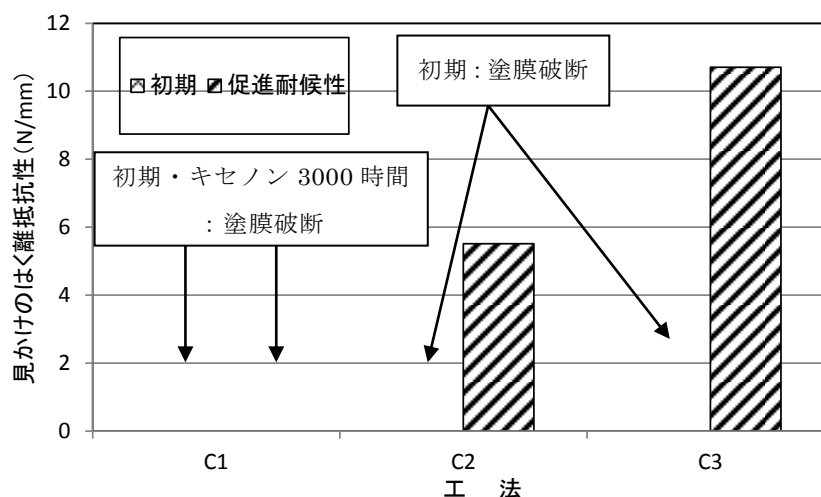


図 5.3.4.7 見かけのはく離抵抗性経時変化 (C1・C2・C3)

表 5.3.4.3 見かけのはく離抵抗性試験後のはく離箇所一覧表

工 法	見かけのはく離抵抗性のはく離箇所	
	初期	促進耐候性試験 キセノン 3000 時間
E1(エポキシ樹脂系+柔軟型ウレタン樹脂系)	AB	AB
E4(エポキシ樹脂系+柔軟型ふっ素樹脂系)	AB	AB
E5(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	BK	BK
E6(エポキシ樹脂系+アクリルウレタン樹脂系)	—	AB
R1(クロロプレンゴム系+クロロスルホン化ポリエチレンゴム系)	BG	BK
R2(クロロプレンゴム系+ハルスハイブリッド系)	BK	BK
U1(ウレアウレタン系+アクリルウレタン系)	AA	BK
C1(ポリマーセメント系)	—	—
C2(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	—	BG
C3(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	—	AB

— : 塗膜破断 (試験開始時での破断)



AA : 基板破壊 (レイタンス層を含む)

BG : 塗布材内の凝集破壊



BK : 塗布材間の界面破断

AB : 基板と塗布材間の界面破断

前項 5.3.4 (1)(a) 付着強度試験で基板破壊のため、工法間の性能比較が困難であったエポキシ系 E1・E4・E5・E6 およびクロロプレンゴム系 R1・R2 について、工法および試験条件間に差が認められるかを統計的に検討した結果を表 5.3.4.4 に示す。なお、エポキシ系 E6 は初期では塗膜破断により試験ができなかったため統計処理から除外する。危険率 5%において工法間については分散比 : 1.280, 境界値 : 6.388, 試験条件については分散比 : 1.743, 境界値 : 7.709 となり、いずれも有意差は認められない。

表 5.3.4.4 付着強度試験で基板破壊を起こした工法の
見かけのはく離抵抗性試験に関する分散分析表

変動要因	変動	自由度	分散	観測された分散比	F (0.05)
工 法	5.281	4	1.320	1.280	6.388
試験条件	1.798	1	1.798	1.743	7.709
誤 差	4.125	4	1.031		
合 計	11.204	9			

次に促進耐候性試験後の試験方法ごとの標準偏差を比較したところ、付着強度試験： $\sigma=0.281$ 、見かけのはく離抵抗性試験： $\sigma=16.495$ となり、付着強度試験における工法間のばらつきより見かけのはく離抵抗性試験での工法間のばらつきが大きいことがわかる。すなわち、付着強度試験で得られた工法間のデータは比較的平均値付近に分布していると考えられるが、見かけのはく離抵抗性試験で得られた工法間の各データは、付着強度試験のデータの分布に比べて平均値からのばらつきが大きいことがわかる。したがって、付着強度試験では見かけのはく離抵抗性試験に比べ標準偏差が小さく、基板破壊を起こした工法間の比較が困難であったが、見かけのはく離抵抗性試験では付着強度試験に比べてデータのばらつきが大きいため、付着強度試験よりも工法間の違いが顕著であると考えられる。さらに、促進耐候性試験では、いずれの工法についても見かけのはく離抵抗性試験後のはがれ箇所が基板破壊ではなく、各工法に用いられている塗布材に関する箇所がウィークポイントとして検出されている。そこで、見かけのはく離抵抗性およびそのはがれ箇所の違いより、各工法での性能評価も可能と考え、工法間の検討を行う。以下に検討結果を示す。

見かけのはく離抵抗性が低下したのが図 5.3.4.6 より、クロロプレンゴム系 R1・R2 およびウレアウレタン系 U1 の 3 工法、初期では塗膜破断のため試験不能であったが、キセノン 3000 時間後では、試験可能となったものが図 5.3.4.5 のエポキシ系 E6 および図 5.3.4.7 のポリマーセメント系 C2・C3 の 3 工法、増加したものが図 5.3.4.5 のエポキシ系 E1・E4・E5 の 3 工法となった。初期より低下傾向を示したクロロプレンゴム系 R1・R2、およびウレアウレタン系 U1 の 3 仕工法は、表 5.3.4.3 に示すように塗布材間で界面破断を起こし、何れも各界面にウィークポイントがあることが確認できる。特に、クロロプレンゴム系 R1 は塗布材内の凝集破壊、ウレアウレタン系 U1 は脆弱層を含むはく離からの変化である。初期では塗膜破断のため測定できなかったエポキシ系 E6 やポリマーセメント系 C2・C3 は、促進耐候性試験後では測定可能となった。低下した先の 3 工法（クロロプレンゴム系 R1・R2 およびウレアウレタン系 U1）を含め、劣化傾向にあると考える。増加傾向を示したエポキシ系 E1・E4・E5 の 3 工法は、性能値として劣化傾向は認められないが、エポキシ系 E1 および E4 は基板と塗布材間、E5 は塗布材間での界面破断を起こし、クロロプレンゴム系 R1・R2、およびウレアウレタン系 U1 同様に各塗装系内にウィークポイントがあることがわかる。

以上より、見かけのはく離抵抗性試験では付着強度試験とは異なり、はく離箇所を考慮することで、3000 時間のキセノン照射による促進耐候性試験でも、劣化傾向を確認することが可能となった。

(2) 耐久性サイクル試験

耐久性サイクル試験後の(a)付着強度試験および(b)見かけのはく離抵抗性試験を実施した結果を以下に述べる。

(a) 付着強度試験

初期および耐久性サイクル試験後の付着強度結果として、図 5.3.4.8 にエポキシ系 E1・E4・E5・E6、図 5.3.4.9 にクロロプレングム系 R1・R2 およびウレアウレタン系 U1、図 5.3.4.10 にポリマーセメント系 C1・C2・C3、各破壊箇所を表 5.3.4.5 に、その破壊箇所の説明を図 5.3.4.11 に示す。

図 5.3.4.8～図 5.3.4.10 より、耐久性サイクル試験後の付着強度は、10 工法中 6 工法が初期値を上回り、4 工法が下回る結果となった。

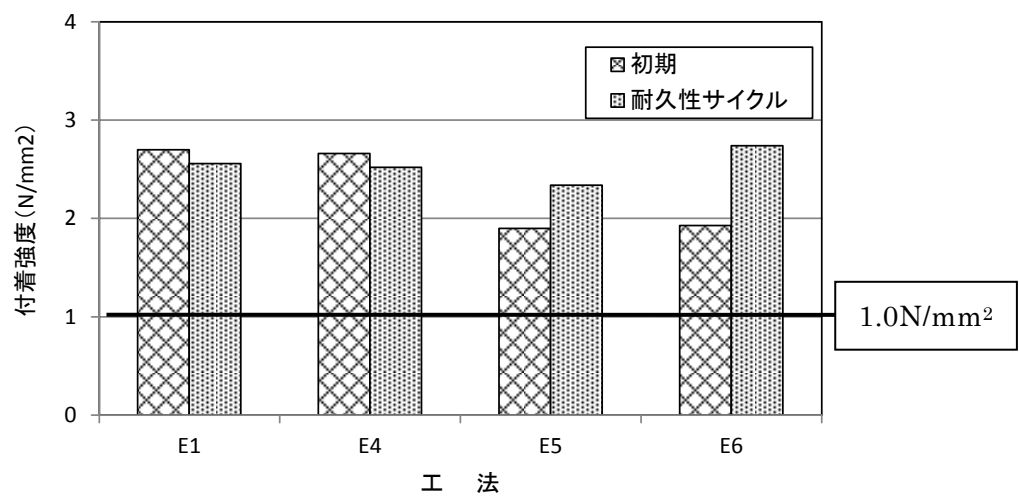


図 5.3.4.8 付着強度経時変化 (E1・E4・E5・E6)

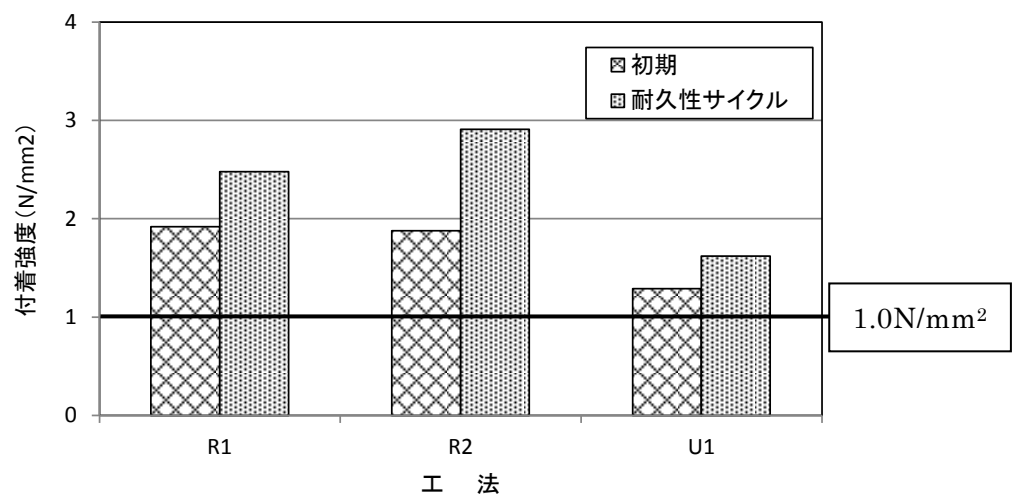


図 5.3.4.9 付着強度経時変化 (R1・R2・U1)

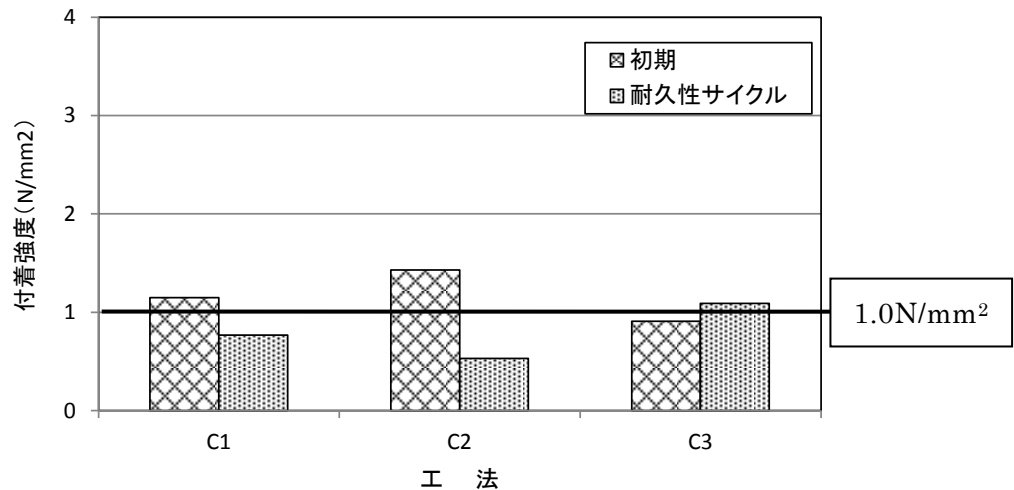


図 5.3.4.10 付着強度経時変化 (C1・C2・C3) [5 サイクル後]

表 5.3.4.5 付着強度試験後の破壊箇所一覧表

工 法	付着強度の破壊箇所	
	初期	耐久性サイクル
E1(エポキシ樹脂系+柔軟型ウレタン樹脂系)	A	A
E4(エポキシ樹脂系+柔軟型ふっ素樹脂系)	A	A
E5(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	A	A
E6(エポキシ樹脂系+アクリルウレタン樹脂系)	A	A
R1(クロロプレングム系+クロロスルホン化ポリエチレングム系)	BK	A
R2(クロロプレングム系+ハルスハイブリッド系)	A	A
U1(ウレアウレタン系+アクリルウレタン系)	A	AB
C1(ポリマーセメント系)	A	BG 注1)
C2(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	BG	BG 注1)
C3(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	BG	BG 注1)

注1) 塗膜欠陥が激したため 5 サイクルでの試験結果

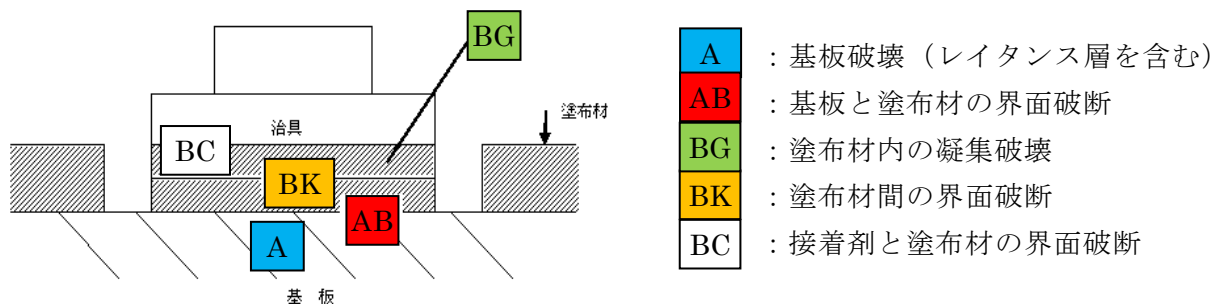


図 5.3.4.11 付着強度試験の破壊箇所の説明

低下したもののうち、エポキシ系 E1・E4 は基板破壊を起こし、十分な付着強度を維持している。エポキシ系 E1・E4・E5・E6 およびクロロプレンゴム系 R1・R2 については、耐久性サイクル試験による劣化傾向は認められない。

次に基板破壊を起こした仕様（エポキシ系 E1・E4・E5・E6 およびクロロプレンゴム系 R1・R2）について、促進耐候性試験と同様に、試験条件および仕様間による差が認められるかを統計的に検討する。

表 5.3.4.6 基板破壊を起こした工法に関する分散分析表

変動要因	変 動	自由度	分散	観測された分散比	F (0.05)
工 法	0.417	5	0.083	0.713	5.050
試験条件	0.546	1	0.546	4.663	6.607
誤 差	0.585	5	0.117		
合 計	1.549	11			

表 5.3.4.6 より、危険率 5% で工法間については、分散比 0.713、境界値 5.050 で有意差は認められず、初期値と耐久性サイクル後についても、分散比 4.663、境界値 6.607 で有意差は認められない。したがって、5.3.4(1)(a)項の場合と同様に、基板破壊した仕様間での性能比較は困難となった。

ポリマーセメント系の C1・C2 では 1.0N/mm^2 を下回る結果となった。なお、ポリマーセメント系 C1・C2・C3 については、3 (S5) ～4 (S5)¹⁰⁾ 程度の膨れが発生したため、5 サイクルで試験を終了している。ポリマーセメント系 C1・C2・C3 の耐久性サイクル試験 5 サイクル終了後の塗膜状態を、それぞれ写真 5.3.4.1～写真 5.3.4.3 に示す。

また、この 3 工法については、促進耐候性試験後と同じ破壊箇所（塗布材内の凝集破壊）を示しているが、付着強度は促進耐候性試験後よりも低い値を示し、劣化傾向がうかがえる。ただし、膨れの大きな箇所については、写真 5.3.4.4 に示すような基板との付着性に問題がある、基板と塗布材での界面破断を起こし、促進耐候性試験では見られなかった劣化傾向が確認された。なお、特に膨れ等の欠陥のない箇所では塗布材内の凝集破壊を示している。

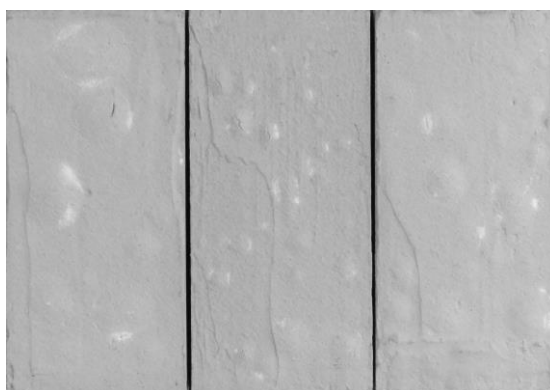


写真 5.3.4.1 耐久性サイクル試験 5 サイクル後外観 (C1)

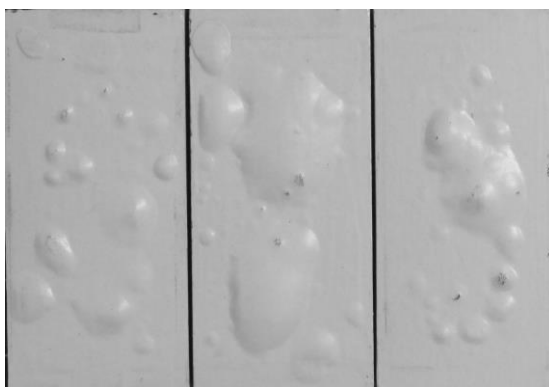


写真 5.3.4.2 耐久性サイクル試験 5 サイクル後外観 (C2)

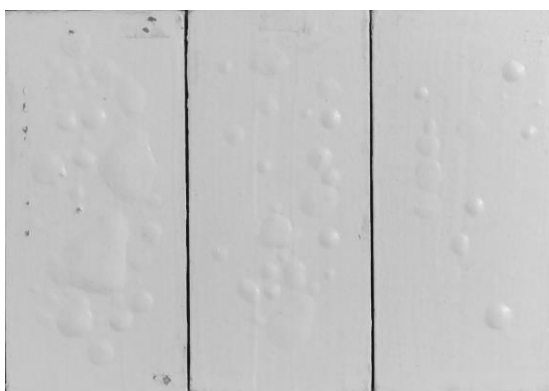


写真 5.3.4.3 耐久性サイクル試験 5 サイクル後外観 (C3)

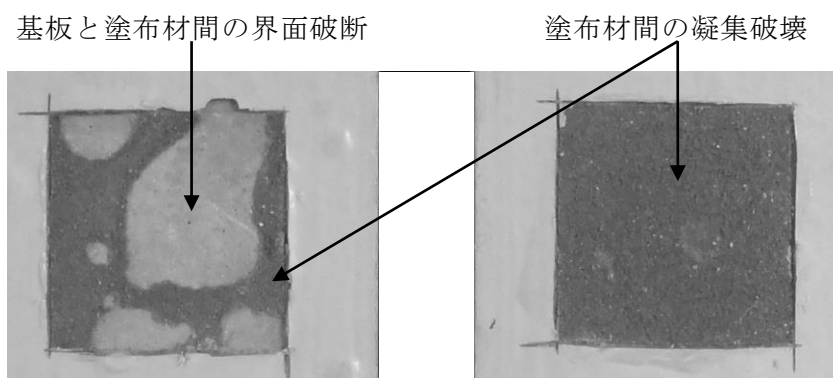


写真 5.3.4.4 付着強度試験後の破壊状態

ウレアウレタン系の U1 は、初期に比べ若干大きな値を示しているが、初期の破壊箇所が基板破壊であったものが、耐久性サイクル試験では基板と塗布材の界面破断へと変化している。基板表面付近では、基板と塗布材間に脆弱層が発生しており、付着力の低下傾向を示す結果である。

以上より、耐久性サイクル試験では、一部の工法において促進耐候性試験では発生しなかった膨れ等の塗膜欠陥を起こすものがあり、促進耐候性試験に比べて劣化傾向を示すものも確認できた。今回、ポリマーセメント系の材料については早期より塗膜欠陥が発生したが、

施工後 10 年以上の高温多湿環境下の実橋脚では橋脚中部, 下部に膨れやはく離等の欠陥が確認されている事例¹¹⁾もあり, 塗膜欠陥の再現が図られているものと考えられる。ただし, 促進環境があまりにも過酷である場合, 劣化の機構が現実的でない状況も生まれるため注意が必要であるが, 樹脂系によってはサイクル数を短縮することで対応可能と考える。なぜならば, 5 サイクル以下の小刻みなサイクル数で, 各付着性能の評価を行うことで, 劣化メカニズム自体が相違するのか, メカニズムは同じで劣化プロセス (促進倍率) が急激になっているのかについて把握できるものと考えられるからである。

(b) 見かけのはく離抵抗性試験

促進耐候性試験後と同様, 初期および耐久性サイクル試験後の見かけのはく離抵抗性試験結果として, 図 5.3.4.12 にエポキシ系 E1・E4・E5・E6, 図 5.3.4.13 にクロロプレングム系 R1・R2 およびウレアウレタン系 U1, 図 5.3.4.14 にポリマーセメント系 C1・C2・C3, 各はく離箇所を表 5.3.4.7 に示す。

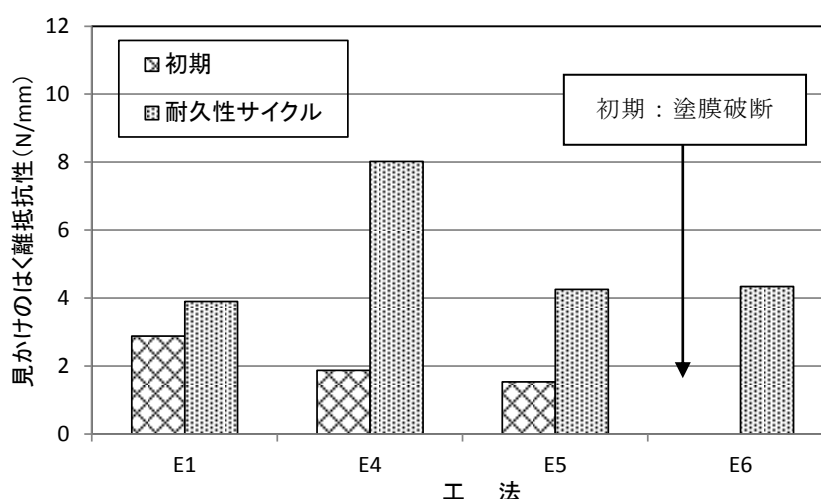


図 5.3.4.12 見かけのはく離抵抗性経時変化 (E1・E4・E5・E6)

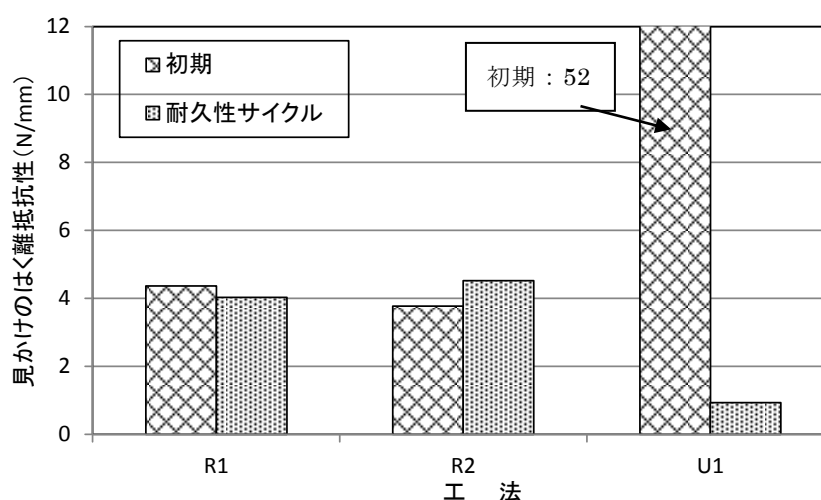


図 5.3.4.13 見かけのはく離抵抗性経時変化 (R1・R2・U1)

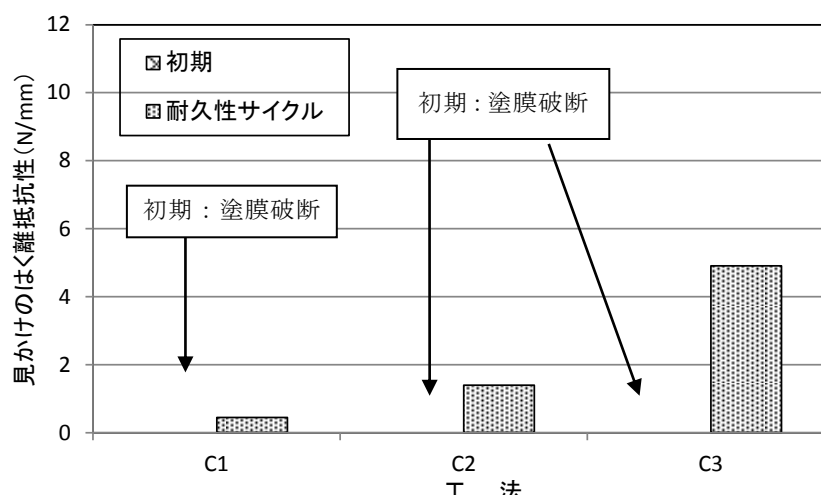


図 5.3.4.14 見かけのはく離抵抗性経時変化 (C1・C2・C3)

表 5.3.4.7 見かけのはく離抵抗性試験後のはく離箇所一覧表

工法	見かけのはく離抵抗性	
	初期	耐久性サイクル
E1(エポキシ樹脂系+柔軟型ウレタン樹脂系)	AB	AB
E4(エポキシ樹脂系+柔軟型ふっ素樹脂系)	AB	AB
E5(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	BK	BK
E6(エポキシ樹脂系+アクリルウレタン樹脂系)	—	AB
R1(クロロプレンゴム系+クロロスルホン化ポリエチレンゴム系)	BG	BK
R2(クロロプレンゴム系+ハルスハイブリッド系)	BK	BK
U1(ウレアウレタン系+アクリルウレタン系)	AA	AB
C1(ポリマーセメント系)	—	BG 注2)
C2(ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	—	BG 注2)
C3(柔軟型ポリマーセメント系+アクリルウレタン系)	—	AB 注2)

注2) 塗膜欠陥が激したため5サイクルでの試験結果

—：塗膜破断（試験開始時での破断）

AA：基板破壊（レイタンス層を含む）

BG：塗布材内の凝集破壊

BK：塗布材間の界面破断

AB：基板と塗布材間の界面破断

前項 5.3.4(2)(a) 付着強度試験で基板破壊のため、工法間の性能比較が困難であったエポキシ系 E1・E4・E5・E6，クロロプレンゴム系 R1・R2 について、工法および試験条件間に差が認められるかを統計的に検討した結果を表 5.3.4.8 示す。

表 5.3.4.8 付着強度試験で基板破壊を起こした工法の
見かけのはく離抵抗性試験に関する分散分析表

変動要因	変 動	自由度	分散	観測された分散比	F (0.05)
工 法	5.012	4	1.253	0.391	6.388
試験条件	10.568	1	10.568	3.295	7.709
誤 差	12.830	4	3.208		
合 計	28.410	9			

なお、エポキシ系 E6 は初期では塗膜破断のため試験ができなかったため統計処理から除外する。危険率 5%において工法間では分散比：0.391，境界値：6.388，試験条件については分散比：3.295，境界値：7.709 となり，いずれも有意差は認められない。

次に耐久性サイクル試験後の試験方法ごとの標準偏差を比較したところ，付着強度試験： $\sigma=0.411$ ，見かけのはく離抵抗性試験： $\sigma=2.057$ となり，付着強度試験における工法間のばらつきより見かけのはく離抵抗性試験での工法間のばらつきが大きいことがわかる。すなわち，促進耐候性試験の場合と同様，付着強度試験で得られた工法間のデータは比較的平均値付近に分布していると考えられるが，見かけのはく離抵抗性試験で得られた工法間の各データは，付着強度試験のデータの分布に比べて平均値からのばらつきが大きいことがわかる。したがって，付着強度試験では見かけのはく離抵抗性試験に比べ標準偏差が小さく，基板破壊を起こした工法間の比較が困難であったが，見かけのはく離抵抗性試験では付着強度試験に比べてデータのばらつきが大きいため，付着強度試験よりも工法間の違いが顕著であると考えられる。さらに，耐久性試験では，いずれの工法についても見かけのはく離抵抗性試験後のはがれ箇所が基板破壊ではなく，各工法に用いられている塗布材に関する箇所がウィークポイントとして検出されている。そこで，見かけのはく離抵抗性およびそのはがれ箇所の違いより各工法での性能評価も可能と考え，工法間の検討を行った。以下に検討結果を示す。

見かけのはく離抵抗性が低下したものが図 5.3.4.13 より，クロロプレンゴム系 R1 およびウレアウレタン系 U1 の 2 工法，塗膜破断のため試験不能であったが，耐久性サイクル試験後では，試験可能となったものが図 5.3.4.12 のエポキシ系 E6 および図 5.3.4.14 のポリマーセメント系 C1・C2・C3 の 4 工法，増加したものが図 5.3.4.12 のエポキシ系 E1，E4，E5 および図 5.3.4.13 のクロロプレンゴム系 R2 の 4 工法となった。

初期値に比べ低下傾向を示したクロロプレンゴム系 R1 については，促進耐候性試験後の場合と同様，はく離箇所は初期の塗布材内の凝集破壊から塗布材間の界面破断へと変化しており，塗布材間での変化が見られた。U1 については，当初基板脆弱部を含む箇所でははく離状況であったが，耐久性サイクル試験後では基板と塗布材間の界面破断へと変化していることおよび見かけのはく離抵抗性が極端に低下していることより，耐久性サイクル試験によって基板と塗布材の間に脆弱層が発生していることが分かる。したがって，基板と塗布材の間に脆弱層が発生したことにより，付着性が阻害され，はがれやすくなっている。なお，付着強度試験では見かけのはく離抵抗性試験と同様，基板と塗布材間の界面破断を起こしている

が、付着強度は初期値 (1.29N/mm^2) を上回る 1.62N/mm^2 を示し、現状では問題ない付着強度である。試験方法による性能差が表れている一例である。付着強度試験と見かけのはく離抵抗性試験の破壊状況を写真 5.3.4.5 に示す。

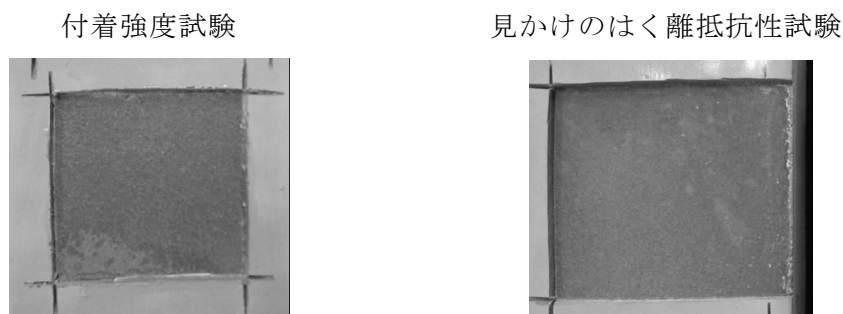


写真 5.3.4.5 試験方法によって劣化傾向が異なる場合の同一破壊例

また、初期に比べて試験が可能となった工法であるエポキシ系 E6、塗装系に脆弱層もなく試験時の曲げに対して弱かったポリマーセメント系 C1・C2・C3 の 4 工法については、塗膜の施工面から 135 度の角度に引っ張る特性上、初期においてははく離に至る前に塗膜破断が生じて試験不能であった。しかし、耐久性サイクル試験を実施することで、その塗装系に脆弱層が現れ、はく離現象が引張つかみ部の破断に先行して発生しており、促進耐候性試験同様、付着面に若干の劣化傾向を示している。なお、ポリマーセメント系の 3 工法については付着強度試験同様、塗膜の欠陥が激しいため 5 サイクルでの試験結果である。付着強度試験同様、著しい膨れが発生している個所では、写真 5.3.4.6 に示すような基板との付着性が問題となる基板と塗布材間の界面破断となり、特に膨れ等の欠陥のない箇所では塗布材内の凝集破断を示している。

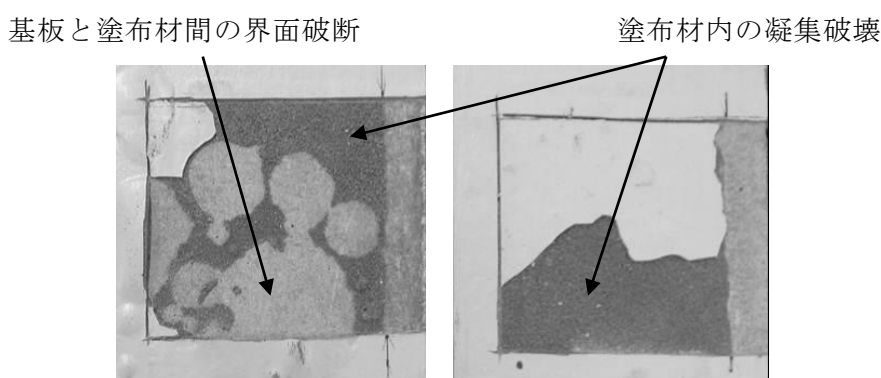


写真 5.3.4.6 見かけのはく離抵抗性試験後の破壊状態

増加傾向を示したエポキシ系 E1・E4・E5、クロロプレンゴム系 R2 については、初期に比べはく離箇所の変化や性能低下もみられず、付着性による劣化の把握は困難であった。

5.3.4 項(2)(a)付着強度試験では、基板破壊のためその性能差が把握し難い状況であったが、見かけのはく離抵抗性試験では、エポキシ系 E1・E4 では基板と塗布材間の界面破断、エポキシ系 E5 およびクロロプレンゴム系 R1・R2 では塗布材間の界面破断となり、仕様間で

の違いが明らかになっている。

以上より、見かけのはく離抵抗性では、はく離箇所の変化を考慮することにより、促進耐候性と同様に劣化傾向を確認することが可能であることがわかる。

5.4 屋外暴露耐候性試験結果との関係

屋外暴露耐候性試験結果と比較した場合、今回実施した2種類の促進劣化試験が、どの程度の年数に相当するかを検討する。なお、屋外暴露耐候性試験結果は2006年より実施している5年目までの試験結果を用い、各促進劣化試験で得られた性能値を示す暴露年数とする。

5.4.1 付着強度試験

初期、屋外暴露耐候性試験1年・3年・5年および促進劣化試験（促進耐候性・耐久性サイクル）の付着強度結果を、図5.4.1.1にエポキシ系E1・E4・E5・E6、図5.4.1.2にクロロプレンゴム系R1・R2およびウレアウレタン系U1、図5.4.1.3にポリマーセメント系C1・C2・C3、各破壊箇所を表5.4.1.1に、その破壊箇所の説明を図5.4.1.4に示す。

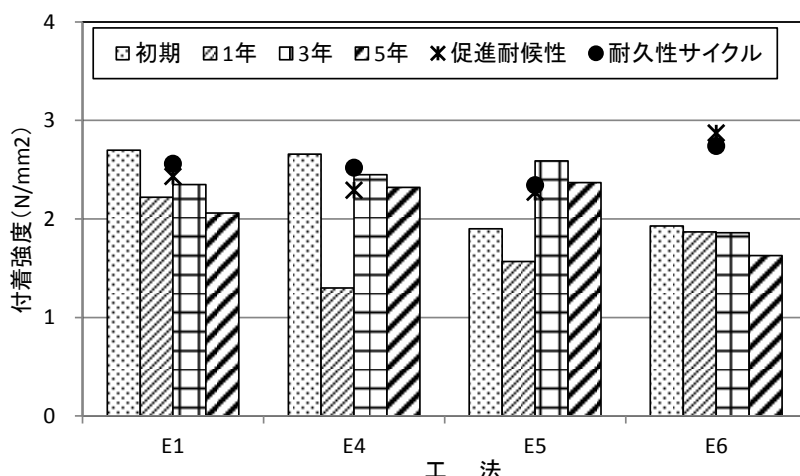


図 5.4.1.1 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後の付着強度（E1・E4・E5・E6）

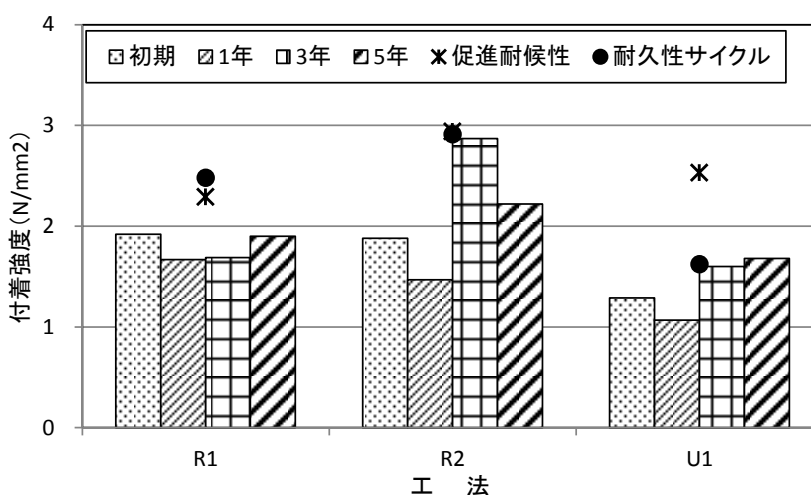


図 5.4.1.2 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後の付着強度（R1・R2・U1）

屋外暴露耐候性試験において基板破壊を示したエポキシ系 E1・E4・E5・E6 およびクロロプレンゴム系 R1・R2 の 6 工法は、表 5.4.1.1 に示すように促進耐候性試験および耐久性サイクル試験でも基板破壊を起こしており、塗膜自身の劣化傾向は掴めず、該当年数の推定は困難である。

表 5.4.1.1 付着強度試験後の破壊箇所一覧表

工 法	付着強度の破壊箇所					
	初期	1 年	3 年	5 年	促進 耐候性	耐久性 サイクル
E1(エポキシ樹脂系+柔軟型ウレタン樹脂系)	A	A	A	A	A	A
E4(エポキシ樹脂系+柔軟型ふっ素樹脂系)	A	A	A	A	A	A
E5(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	A	A	A	A	A	A
E6(エポキシ樹脂系+アクリルウレタン樹脂系)	A	A	A	A	A	A
R1(クロロプレンゴム系 +クロロスルホン化ポリエチレンゴム系)	BK	A	A	A	A	A
R2(クロロプレンゴム系+ハルスハイブリッド系)	A	A	A	A	A	A
U1(ウレアウレタン系+アクリルウレタン系)	A	A	A	A	BK	AB
C1 (ポリマーセメント系)	A	A	BG	A	BG	BG 注 3)
C2 (ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	BG	A	A	A	BG	BG 注 3)
C3 (柔軟型ポリマーセメント系+アクリルウレタン系)	BG	BG	BG	A	BG	BG 注 3)

注 3) 塗膜欠陥が激したため 5 サイクルでの試験結果

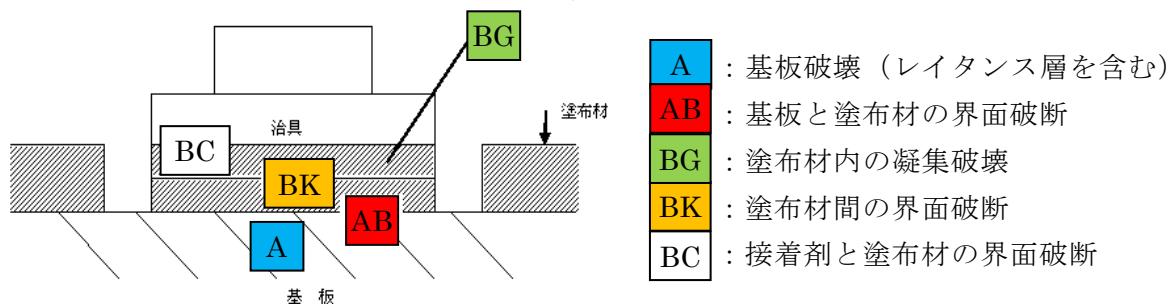


図 5.4.1.4 付着強度試験の破壊箇所の説明

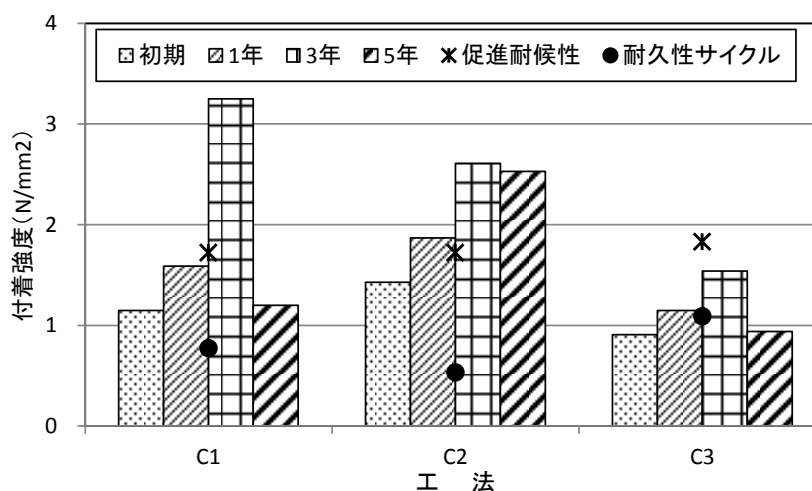


図 5.4.1.3 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後の付着強度 (C1・C2・C3)

ウレアウレタン系 U1 は屋外暴露耐候性試験では脆弱層を含む基板破壊を示していたが、促進耐候性試験では塗布材間の界面破断，耐久性サイクルでは基板と塗布材間の界面破断となり，促進劣化試験を行うことで塗装系自身の劣化傾向を示している．破壊箇所の変化を写真 5.4.1.1 に示す．

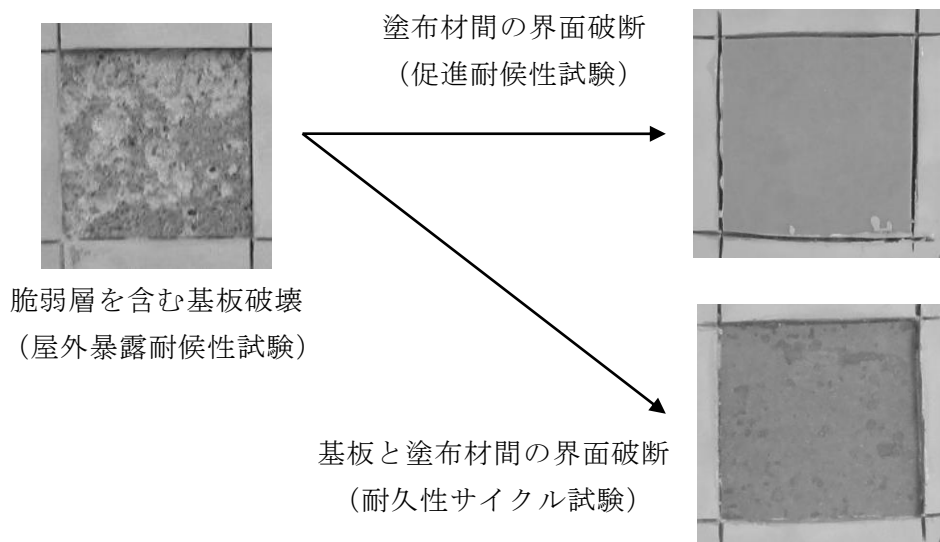


写真 5.4.1.1 ウレアウレタン系 U1 の破壊箇所の変化

促進耐候性試験では初期値を含め暴露後の付着強度よりも更に高い強度を示しているため、該当年数は明確ではない．一方，耐久性サイクル試験では，図 5.4.1.2 より屋外暴露耐候性 3 年～5 年程度の値を示していることがわかる．

今回実施した耐久性サイクル試験は，ポリマーセメント系 C1・C2・C3 に関して 2 サイクル目から徐々に劣化傾向が現れる過酷な条件となった．5 サイクル終了後に付着強度を測定したが，破壊状況や性能値からは暴露年数の比較が困難であった．C3 については屋外暴露耐候性 1 年程度を示している．また，付着強度測定が可能であったことから，5 サイクル以下のサイクル数で小刻みに付着性能を確認することで，劣化機構や過程を含めて暴露試験結果との比較が可能となる．何れにしても促進耐候性試験に比べ，耐久性サイクル試験は水浸漬や温冷繰り返しの工程があることで，塗装系に過酷な劣化状況を作り出している．

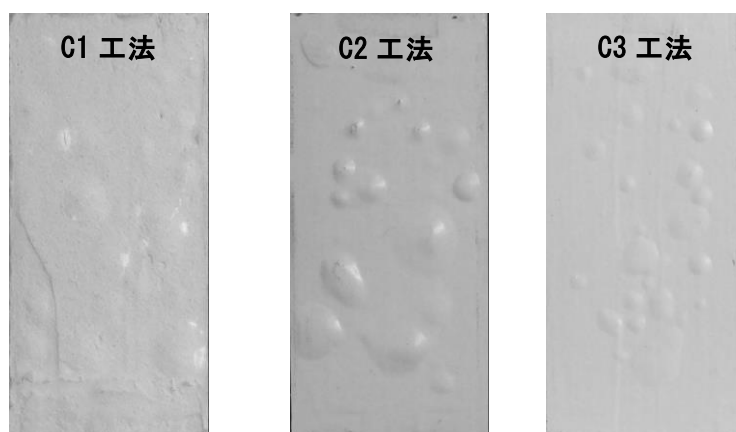


写真 5.4.1.2 耐久性サイクル試験後の塗膜の膨れの例 (ポリマーセメント系)

以上より、基板破壊を示したエポキシ系とクロロプレンゴム系は、工法間の性能比較および暴露との関係は確認できなかった。ウレアウレタン系については、破壊箇所の変化より劣化傾向を掴むことは可能であった。耐久性サイクル試験では暴露3～5年程度に相当することが示された。しかし、単軸引張による付着強度試験では、写真 5.4.1.1 に示すように促進劣化試験を行い破壊箇所が基板と塗布材との界面へと変化していることで塗装系自身の劣化傾向はあるものの、測定された付着強度としてはまだ上昇傾向にあるという反対の傾向が現れることが明らかになった。なお、ポリマーセメント系の耐久性サイクル試験は、促進耐候性試験では発生しなかった塗膜膨れが発生し、ポリマーセメント系に対しては過酷な試験条件となった。塗膜の膨れ状況を写真 5.4.1.2 に示す。

5.4.2 見かけのはく離抵抗性試験

初期、屋外暴露耐候性1年・3年・5年および促進劣化試験（促進耐候性・耐久性サイクル）の付着強度結果を、図 5.4.2.1 にエポキシ系 E1・E4・E5・E6、図 5.4.2.2 にクロロプレンゴム系 R1・R2 およびウレアウレタン系 U1、図 5.4.2.3 にポリマーセメント系 C1・C2・C3、各はく離箇所を表 5.4.2.1 に示す。

表 5.4.2.1 見かけのはく離抵抗性試験後のはく離箇所一覧表

工 法	見かけのはく離抵抗性のはく離箇所 ^{注1)}					
	初期	1 年	3 年	5 年	促進耐 候性	耐久性 サイク
E1(エポキシ樹脂系+柔軟型ウレタン樹脂系)	AB	AB	AB	AB	AB	AB
E4(エポキシ樹脂系+柔軟型ふっ素樹脂系)	AB	AB	AB	AB	AB	AB
E5(エポキシ樹脂系+ふっ素樹脂系)	BK	BK	BK	BK	BK	BK
E6(エポキシ樹脂系+アクリルウレタン樹脂系)	-	-	AA	AB	AB	AB
R1(クロロプレンゴム系 +クロロスルホン化ポリエチレンゴム系)	BG	BG	BG	BG	BK	BK
R2(クロロプレンゴム系+ハルスハイブリッド系)	BK	BK	BK	BK	BK	BK
U1(ウレアウレタン系+アクリルウレタン系)	AA	AA	AB	AA	BK	AB
C1 (ポリマーセメント系)	-	-	-	-	-	BG ^{注4)}
C2 (ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	-	-	AA	AA	BG	BG ^{注4)}
C3 (柔軟型ポリマーセメント系+アクリルシリコン系)	-	-	AB	AB	AB	AB ^{注4)}

注4) 塗膜欠陥が激したため5サイクルでの試験結果

－：塗膜破断（試験開始時での破断）

AA：基板破壊（レイタンス層を含む）

BG：塗布材内の凝集破壊

BK：塗布材間の界面破断

AB：基板と塗布材間の界面破断

付着強度で基板破壊を起こしていたエポキシ系 E1・E4・E5・E6 およびクロロプレンゴム系 R1・R2 の 6 工法については、表 5.4.2.1 に示すように屋外暴露耐候性試験同様に促進劣化試験でも基板破壊以外のはく離状況を示しており、仕様間の比較が可能である。

図 5.4.2.1 より、エポキシ系 E1 は、促進耐候性試験および耐久性サイクル試験では基板と塗布材間の界面破壊を起こしており、双方とも暴露 1 年程度の値を示した。エポキシ系 E4 は、何れの促進劣化試験も屋外暴露耐候性試験後と同様に塗布材間の界面破壊を起こし、促進耐候性試験では 5 年程度の値を示しているが、耐久性サイクル試験では推定できなかった。エポキシ系 E5 についても暴露後と同じ塗布材間の界面破壊であるが、経年で増加傾向にあり、値からは暴露年数を推定するのは困難である。エポキシ系 E6 は何れの促進劣化試験でも基板と塗布材間の界面破断を示しており、暴露 5 年目でははく離状況と一致している。当初塗膜破断を起こしていたが、暴露 3 年よりはく離現象が現れているため、何れの促進劣化試験においても暴露 3 年未満相当と推定される。

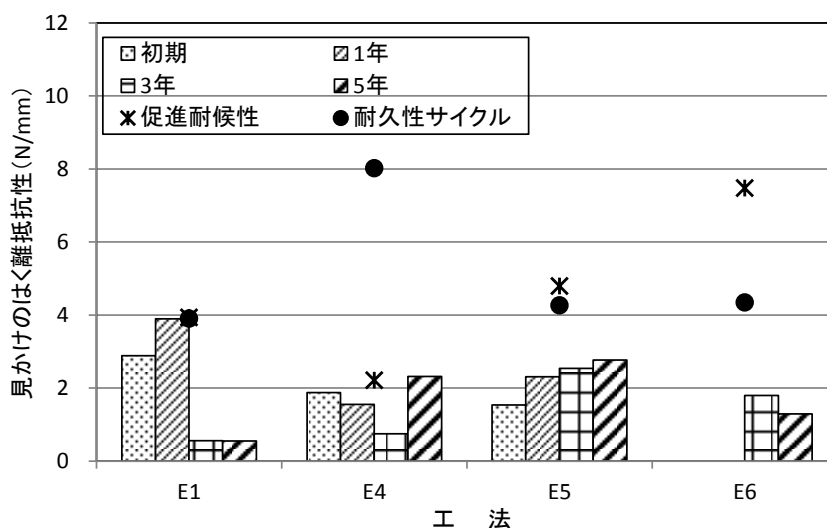


図 5.4.2.1 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後の見かけのはく離抵抗性 (E1・E4・E5・E6)

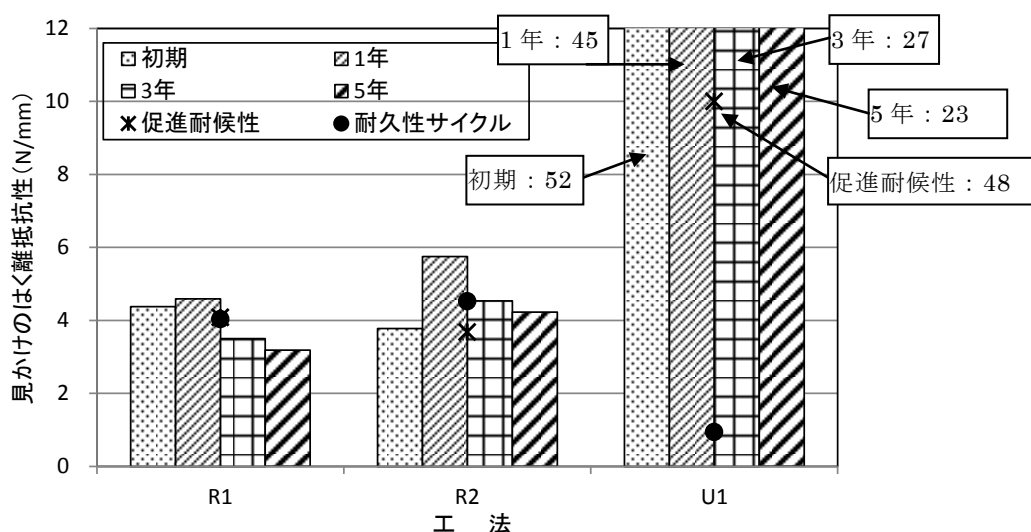


図 5.4.2.2 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後の見かけのはく離抵抗性 (R1・R2・U1)

クロロプレンゴム系 R1 については、初期値を含め暴露後は塗布材内での凝集破壊であるが、何れの促進劣化試験でも塗布材間の界面破壊へと変化しており、暴露 1～3 年相当の値を示している。R2 は何れの促進劣化試験も初期および暴露後と同様、塗布材間の界面破断を示しており、促進耐候性試験では暴露 5 年以上、耐久性サイクル試験では 3 年相当の値を示している。

ウレアウレタン系 U1 は、促進耐候性試験ではなく離箇所が塗布材間の界面破断に変化していることから劣化傾向にあり、性能値からは暴露 1 年程度の値を示している。一方、耐久性サイクル試験では、写真 5.4.2.1 に示すように基板と塗布材間の界面破壊に変化し、促進耐候性試験より大幅な性能値低下が認められた。現時点では暴露年数は掴めていないが、見かけのはく離抵抗性が経年で低下する屋外暴露耐候性試験結果の傾向より、今後暴露年数を経るにつれ、耐久性サイクル試験で得られた性能値に近づくことが推測される。

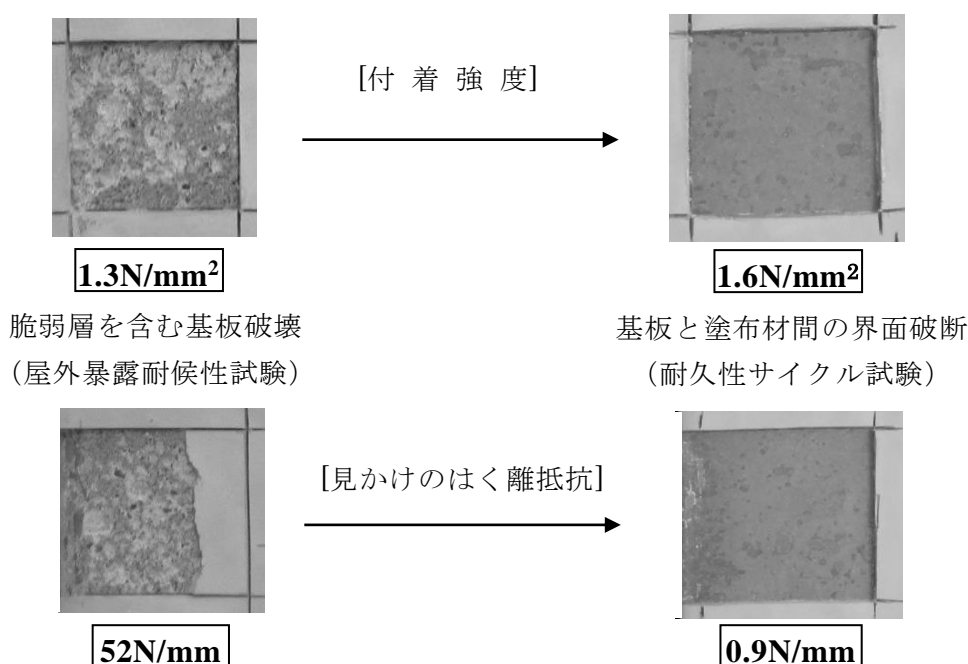


写真 5.4.2.1 同一破壊状況での付着性評価方法の違いによる性能値の変化状況
(ウレアウレタン系 U1)

水浸せきや温冷繰り返しのある耐久性サイクルは、基板と塗布材の間に劣化状況が加速し、はく離状況を考慮した見かけのはく離抵抗性では極端にはがれ易く、性能低下が顕著に現れている。5.4.1 項の付着強度試験で述べた通りウレアウレタン系 U1 は、単軸引張による付着強度試験に関し促進劣化試験を行うことで、はく離箇所が基板と塗布材との界面へと変化し、塗装系自身の劣化傾向はあるものの、測定された付着強度としてはまだ上昇傾向にあるという反対の傾向が認められた。しかし、見かけのはく離抵抗性試験では、はく離箇所の変化と性能低下が一致する傾向が認められている。

ポリマーセメント系の C1, C2, C3 は全て塗装系に脆弱層もなく試験時の曲げに対して弱かったため、初期および暴露 1 年では、はく離抵抗性試験のはく離現象に先行して塗膜が破断した。しかし、暴露試験では 3 年よりポリマーセメント系 C2 は脆弱層を含む基板では

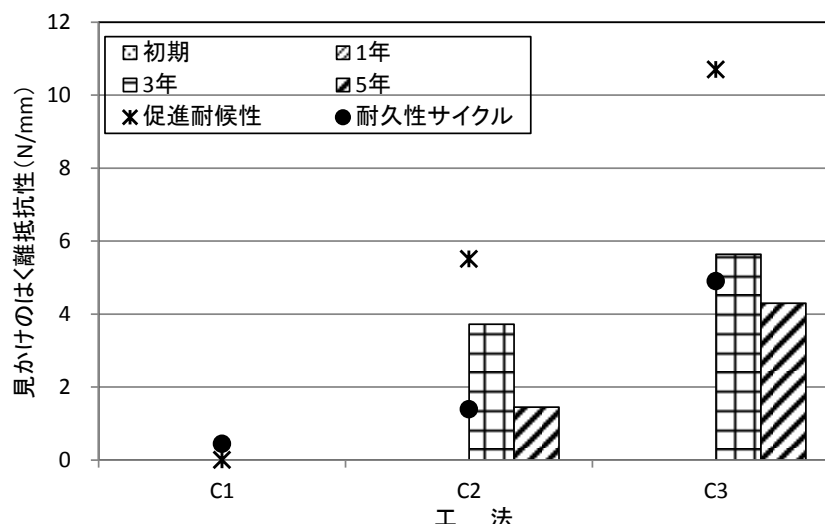


図 5.4.2.3 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後の見かけのはく離抵抗性 (C1・C2・C3)

く離，ポリマーセメント系 C3 は基板と塗布材間の界面ではく離が破断に先行して生じることになり試験が可能となった．また，促進劣化試験においても促進耐候性試験後ではポリマーセメント系 C2 が塗布材内での凝集，ポリマーセメント系 C3 が基板と塗布材の界面ではく離，耐久性サイクル後ではポリマーセメント系 C1，C2 が塗布材内の凝集，ポリマーセメント系 C3 が基板と塗布材間の界面ではく離に至ることになったことから，各塗装系に脆弱部が発生したために塗装系の劣化が起こっている．この傾向は，屋外暴露耐候性試験と比べてはく離モードに多少の違いはあるものの，暴露での 3～5 年の結果と類似したものである．なお，ポリマーセメント系 C1 は，暴露 5 年では塗装系に脆弱部の可能性を示唆するはく離現象は認められていない．ただし，他のポリマーセメント系と同様の劣化メカニズムであるとすれば，今後脆弱層が発生する可能性がある．

以上より，見かけのはく離抵抗性試験では，付着強度試験で基板破壊を示し，性能比較が困難であったエポキシ系およびクロロプレンゴム系については仕様間比較が可能となり，一部の仕様で暴露年数の推定も可能となった．ウレアウレタン系の促進耐候性試験では，暴露年数の推定が可能であった．なお，耐久性サイクル試験では性能低下が著しく，屋外暴露耐候性試験 5 年以上の性能低下となった．また，はく離箇所（破壊箇所）の変化と性能値低下の関係では，付着強度試験とは異なる劣化傾向が認められた．ポリマーセメント系の耐久性サイクル試験は，促進耐候性試験では発生しなかった塗膜膨れが発生し，過酷な試験条件となった．

5.4.3 屋外暴露耐候性試験結果との相関性

各促進劣化試験後の見かけのはく離抵抗性試験結果と屋外暴露耐候性試験の関係を，促進耐候性試験 3000 時間後および耐久性サイクル試験 10 サイクル後の性能値を初期からの低下率として表し，それぞれの相関係数を算出したものを表 5.4.3.1 に，散布図を図 5.4.3.1 に示す．なお，初期に塗膜破断を起こした E6・C1・C2・C3 および促進劣化後の性能値が極端に高い E4 は除外する．また，付着強度試験については，そのほとんどが基板破壊のため検討していない．

表 5.4.3.1 屋外暴露耐候性試験と各促進劣化試験の相関係数一覧表

屋外暴露耐候性(年数)	促進耐候性 3000 時間	耐久性サイクル 10 サイクル
1 年	0.531	0.793
3 年	0.662	0.685
5 年	0.754	0.761

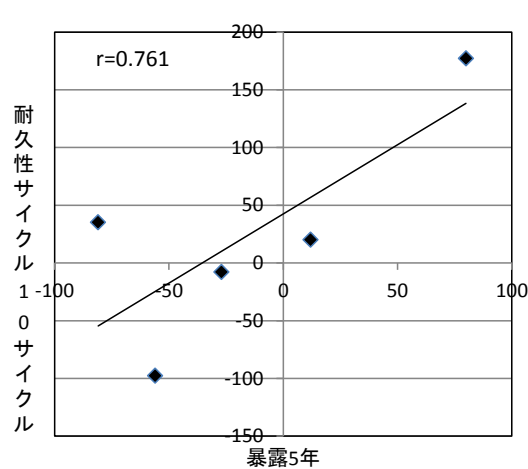
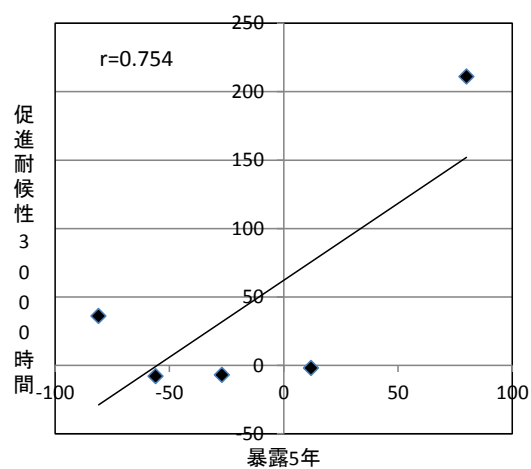
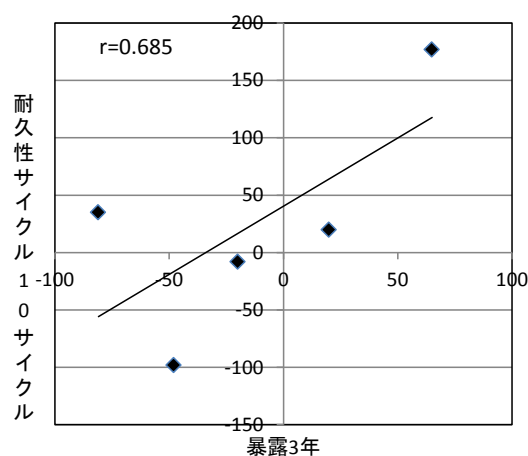
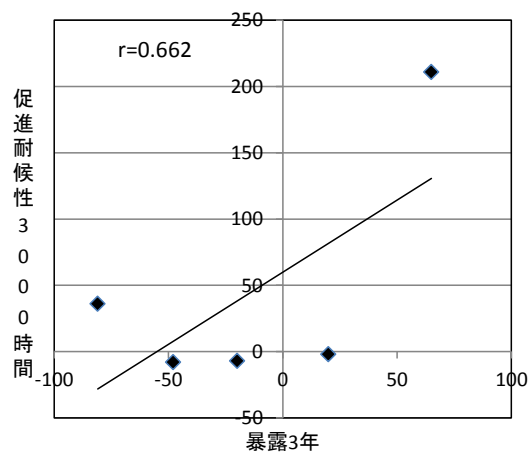
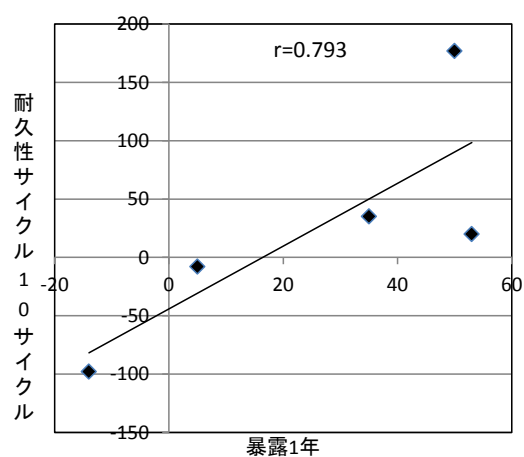
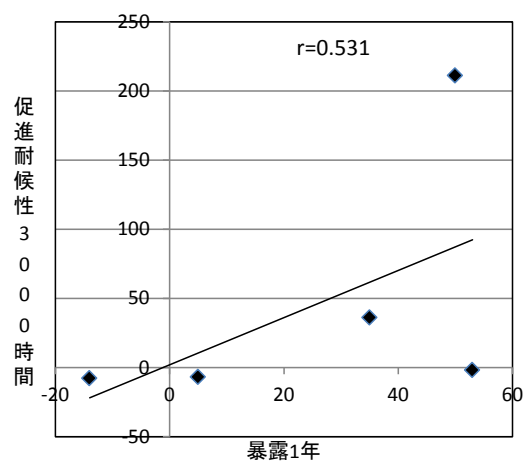


図 5.4.3.1 屋外暴露耐候性試験と促進耐候性および耐久性サイクル試験の関係

見かけのはく離抵抗性試験では、屋外暴露耐候性試験と促進耐候性試験および耐久性サイクル試験の双方で比較的良好な相関関係が得られている。暴露 1 年では耐久性サイクル 10 サイクルの方が $r=0.793$ で優位であるが、暴露 3 年および 5 年では大きな差はなく、耐久性サイクル試験の方が若干良い傾向を示している程度である。いずれにしても促進耐候性試験に比べ、耐久性サイクル試験の方が良好な相関傾向を示している。

5.5 まとめ

2 種類の促進劣化試験（促進耐候性試験および耐久性サイクル試験）後の付着性評価および屋外暴露耐候性試験との関係を検討した結果を以下にまとめる。

- (1) 促進耐候性試験および耐久性サイクル試験について、基板破壊を起こすものや基板破壊以外で同一破壊箇所の場合でも、その多くは付着強度が低下傾向にないものがあり、付着強度の劣化傾向は把握し難いことが確認された^{7), 8), 9)}。一方、見かけのはく離抵抗性試験では、はく離箇所の変化を考慮した場合、劣化傾向を確認することが可能であることが明らかにになった。^{7), 8), 9)}
- (2) 耐久性サイクル試験は、工法によっては促進耐候性試験で発生しなかったような塗膜欠陥（主に膨れ現象）を起こす工法（ポリマーセメント系：C1・C2・C3）や、見かけのはく離抵抗性試験で性能値が極端に低下する工法（ウレアウレタン系：U1）が確認された。今回、ポリマーセメント系の材料については早期より塗膜欠陥が発生したが、施工後 10 年以上の高温多湿環境下の実橋脚では橋脚中部、下部に膨れやはく離等の欠陥が確認されている事例¹¹⁾もあり、塗膜欠陥の再現が図られているものと考ええる。ただ、実施するサイクル数については更なる検討が必要である。
- (3) 促進劣化試験と屋外暴露耐候性試験結果との関係を検討したところ、付着強度試験に関して、基板破壊を示す工法間の性能比較および暴露との関係は推定できなかった。しかし、破壊箇所に変化のあった工法では、一部暴露年数の推定が可能となった。
一方、見かけのはく離抵抗性試験では、付着強度試験で性能比較が困難であった基板破壊を示した工法間での比較および暴露年数の推定も可能となった。
- (4) 付着強度試験は、暴露試験でその多くが基板破壊を示し、促進劣化試験後もその傾向があり、工法間での比較が困難であった。しかし、見かけのはく離抵抗性では暴露試験で劣化部の検出が可能となり、促進劣化試験後も付着強度試験に比べ工法間の比較ができ、付着性評価に対する有効性が認められた。必ずしも正確な相関性はつかめていないが、暴露試験を継続し、破壊およびはく離形態に着目し、各塗装系での脆弱層の変化を追うことで、評価手法、促進劣化手法の確立につなげたい。
- (5) 各促進劣化試験後の見かけのはく離抵抗性試験結果と屋外暴露耐候性試験の関係を低下率で検討したところ、キセノン照射による促進耐候性試験に比べ、湿潤環境や温度変化を加味した耐久性サイクル試験の方が若干良好な相関傾向が得られた。

今回、屋外暴露試験との相関が比較的良好であった耐久性サイクル試験で工法間を比較すると、樹脂系の中での差も大きく一概には言えないが、見かけのはく離抵抗性試験ではエポキシ樹脂系およびクロロプレンゴム系が比較的良好な状態であった。なお、付着強度試験で

は比較は困難である。

なお、2 種類の促進劣化試験との関係で用いた試験結果は、屋外暴露耐候性試験の一部であり、現在も継続中である。今後の暴露試験結果と比較することで、促進劣化試験の検討を重ねるとともに、表面被覆工法の耐久性能に関する評価手法の確立につなげていく予定である。

[第 5 章 参考文献]

- 1) 社団法人 日本塗料工業会：各種耐候試験機の調査研究報告，2003. 4
- 2) 社団法人 日本塗料工業会：建築構造物用塗料の耐候性に関する研究（報告書 第 2 報），2000. 10
- 3) 財団法人 日本ウエザリングテストセンター：促進暴露試験ハンドブック [I] 促進耐候性試験，平成 21 年 4 月
- 4) 須賀長市：耐候光と色彩，スガ試験機株式会社，1988.2
- 5) 飯田 眞司，高柳 弘道，矢部 政実：促進耐候性試験法，塗料の研究，No.145，Mar.2006
- 6) 日本規格協会：JIS B 7754 キセノンアークランプ式耐光性及び耐候性試験機（1991）
- 7) 樺山好幸，吉田幸信，吉田敦，山田卓司，宮川豊章：塗装系防食材の追跡調査に基づく耐久性能評価と付着性能評価手法の提案，コンクリート工学論文集，Vol.14, No.3, pp.11-22, 2003.3
- 8) 渡辺 佳彦，荒巻 智，松田 好史，山田 卓司，宮川 豊章：山陽新幹線 RC 高架橋に適用する表面被覆工法の評価方法について，材料，Vol.58, No.8, pp691-696, 2009.8
- 9) 山田 卓司，佃 洋一，山本 貴士，国枝 稔，宮川 豊章：表面被覆工法の付着特性に着目した耐久性評価方法に関する研究，材料，Vol.61, No.10, pp.715-720, 2012.10
- 10) 日本規格協会：塗料一般試験方法－第 8 部：塗膜劣化の評価－第 2 節：膨れの等級，2008
- 11) 竈本 武弘，野島 昭二，藤田 庫雄：コンクリート表面被覆材の耐久性向上に関する検討，コンクリート工学，Vol.47, No.2, 2009.2

第6章 表面被覆工法のひび割れ追従性に関する研究

6.1 はじめに

これまでコンクリート構造物と表面被覆工法の付着性に焦点をあて、屋外暴露耐候性試験後の試験片を劣化させた状況での二次物性として、3種類の付着性評価手法についての比較を行い、付着性評価の考え方や耐久性、また、屋外暴露耐候性試験と促進劣化試験の関係について述べた。

本章では、表面被覆工法の耐久性を検討するうえで、付着性と同様、劣化因子の遮断性を維持するために重要な項目である「ひび割れ追従性」について検討することとする。

コンクリート構造物の補修に用いられる表面被覆工法の劣化形態として、膨れ・割れ・はがれ等が生じている事例が報告されている¹⁾。例えば、第2章で述べた高知県 浦戸大橋での試験塗装10年目の追跡調査の結果、コンクリート構造物の塗装系防食材のひび割れ追従性について、一般平面部に異常は認められなかったが、橋脚の打ち継部でのひび割れ箇所が増大傾向にあること等が報告されている。^{1), 2)} 当時、供試体によるひび割れ追従性³⁾の室内試験では規準を満足していたが、実橋では7年目より塗膜がコンクリート躯体のひび割れに追従できず、ひび割れが急速に進行していたというものである。

塗膜の「割れ」の多くは、コンクリート躯体に発生した「割れ」に追従して発生するものである。道路橋の場合、施工段階から自動車の荷重を受ける状況にあるため、

- ① 施工中の塗膜が硬化していない段階および施工後の活荷重によるひび割れの開閉
- ② 施工後塗膜のコンクリートひび割れに対する追従性の不足
- ③ 日間変動（温度変化）によるひび割れの動きに耐えられない

等が考えられる。ひび割れ幅の日間変動については、マスコンクリートへの塗装を実施するにあたり、マスコンクリートのひび割れ挙動を実構造物で調査した事例として、気温1℃当たり15μm程度の動きがあるという調査結果⁴⁾が報告されている。即ち、夏期(37℃)に0.1mm幅のものが冬期(5℃)には0.6mm程度に拡大することになる。

したがって、表面被覆工法を適用するコンクリート躯体の状況に併せて、適切な性能を有する表面被覆材を選定するには、付着性に加えひび割れ追従性の評価が重要である。

通常、ひび割れ追従性は、**土木学会規準 JSCE-K-532-2010 表面被覆材のひび割れ追従性試験方法**などにより評価される場合が多い。しかし、長期的な動的作用（疲労）による影響を確認し、必要に応じて補修設計レベルに反映させることも重要である⁵⁾。

表面被覆材の疲労破壊に対する抵抗性に関しては、飯塚⁶⁾らは、15種類の仕様を対象とした100万回疲労試験、さらに5種類の仕様を対象とした1000万回疲労試験を実施している。いずれも、ひび割れ追従性に着目した試験であり、例えば試験条件として±0.02mm, 10Hzの変動を用いている。また、成瀬ら⁷⁾も、室内動的ひび割れ追従性試験を行っている。しかし、これらの実験的研究は、ある条件に対する表面被覆材の疲労破壊に対する抵抗性を確認したに過ぎず、破壊のメカニズムに着目した表面被覆材の疲労特性が明らかにされたものではない。

また、江成⁸⁾らは表面被覆工法の耐久性能を評価する項目に、ひび割れ部における補修材料の機械的な寿命評価法を検討するため、偏心型の疲労試験機（曲げ疲労試験）を開発して

いる。国枝ら⁵⁾は、3種類の表面被覆材を対象としたひび割れ追従性疲労試験を実施し、疲労破壊に対する抵抗性を実験的に確認している。さらに疲労試験後の供試体の破断面を観察することで、表面被覆材の疲労破壊のメカニズムについての考察を加えている。

表面保護工の補修・補強に関して、下地コンクリートのひび割れに追従できる性能を把握するため、第6章では表面被覆工法に用いられる表面被覆材のひび割れ追従性について、第4章で採用した15工法の室内試験結果（初期値）、第5章で採用した促進劣化試験方法によって得られた結果に基づき、屋外暴露耐候性試験結果との関係について述べるとともに、ひび割れ追従性に関する耐久性について検討を加える。

6.2 試験概要

本章では、表面被覆工法に用いられる表面被覆材のひび割れ追従性を評価するため、屋外暴露耐候性試験を行う。なお、屋外暴露耐候性に供した試験片は、一般財団法人 日本ウエザリングテストセンターの所有する銚子暴露場にて屋外暴露試験を行う。また、同時に初期物性確認用の供試体にて、初期物性評価を実施している。さらに、屋外暴露耐候性試験と2種類の促進劣化試験（促進耐候性試験および耐久性サイクル試験）を比較し、促進劣化試験の有用性および屋外暴露耐候性試験との関係を検討することとする。なお、モルタル基板（120mm×40mm×10mm）に所定の表面被覆工法を施したものを供試体とする。

6.3 室内試験によるひび割れ追従性

屋外暴露耐候性によるひび割れ追従性の耐久性を検討するため、それぞれの工法について、室内試験で初期値を求めることとする。

6.3.1 試験実施工法

今回試験に供した工法は、現在、コンクリート構造物の補修や予防保全に適用され、表面被覆工法で用いられている主材の多くを占める、

- ① エポキシ樹脂系（柔軟形を含む） 6工法
- ② 変性アクリル系 2工法
- ③ クロロブレンゴム系 2工法
- ④ ウレアウレタン系 1工法
- ⑤ ポリマーセメント系（アクリルエマルジョン系）[柔軟形を含む] 4工法

の5種類を選定し、モルタル板（120mm×40mm×10mm）に表6.3.1.1に示す15工法を所定の施工方法に従って施したものを試験片として試験に供する。

6.3.2 試験方法

「土木学会規準 JSCE-K-532-2010 表面被覆材のひび割れ追従性試験方法」による。なお、試験実施環境は23±2℃とし、試験方法の詳細は第3章 3.4.4項に記載。

表 6.3.1.1 試験に供した表面被覆工法一覧

工法	主材[膜厚：μm]	仕上げ材（上塗材）[膜厚：μm]
E1	エポキシ樹脂系（160μm）	柔軟形ウレタン樹脂系（30μm）
E2	エポキシ樹脂系（186μm）	ふっ素樹脂系（30μm）
E3	エポキシ樹脂系（150μm）	ふっ素樹脂系（30μm）
E4	エポキシ樹脂系（320μm）	柔軟形ふっ素樹脂系（30μm）
E5	エポキシ樹脂系（1000μm）	ふっ素樹脂系（38μm）
E6	柔軟形エポキシ樹脂系（200μm）	アクリルウレタン系（30μm）
MA1	変性アクリル系（800μm）	ウレタン系（80μm）
MA2	変性アクリル系（800μm）	ふっ素樹脂系（80μm）
R1	クロロプレンゴム系（265μm）	クロロスルフォン化 ポリエチレンゴム系（70μm）
R2	クロロプレンゴム系（465μm）	ハルスハイブリッド系（60μm） [クロロスルフォン化ポリエチレンゴム]
U1	ウレアウレタン系（2250μm）	アクリルウレタン系（80μm）
C1	ポリマーセメント系（465μm） [アクリルエマルジョン]	ポリマーセメント系（1050μm） [アクリルエマルジョン]
C2	ポリマーセメント系（660μm） [アクリルエマルジョン]	アクリルシリコン系（75μm）
C3	ポリマーセメント系（660μm） [アクリルエマルジョン]	アクリルシリコン系（75μm）
C4	柔軟形ポリマーセメント系（1950μm） [アクリルエマルジョン]	アクリルウレタン系（50μm）

6.3.3 試験結果および考察

今回試験に供した 15 工法について、室内環境におけるひび割れ追従性の試験結果を図 6.3.3.1 に示す。

初期値としては 15 工法のすべてが、東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社（以下「NEXCO」と記す）、構造物施工管理要領 コンクリート塗装材の性能照査に規定されているひび割れ追従性の標準状態の基準値である 0.40mm を上回る結果である。

しかし、特に伸びを要求される場合を想定した基準値である 0.80mm に対しては、15 工法中エポキシ系 E1（0.76mm）、E6（0.60mm）、および変性アクリル系 MA2（0.79mm）の 3 工

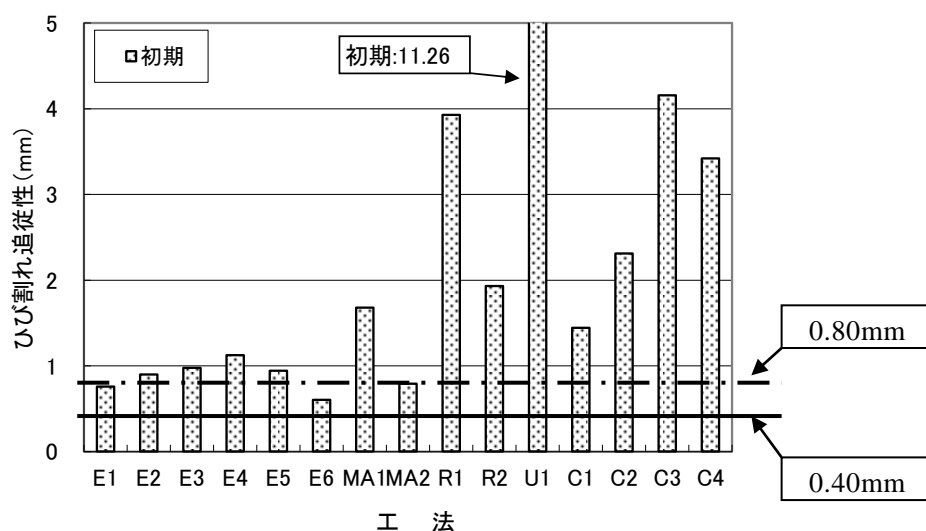


図 6.3.3.1 ひび割れ追従性試験結果

法が若干ではあるが下回る結果となった。一方、ウレアウレタン系(膜厚:2250 μm)は、11.2mmを示し、膜厚効果が大きく表れ、既存の研究結果⁹⁾と同じ傾向を示している。

主材の種類別でみると、エポキシ系の6工法それぞれの主材層の膜厚が厚いほうから順にE5(1000 μm)>E4(320 μm)>E6(200 μm)>E2(186 μm)>E1(160 μm)>E3(150 μm)であるが、ひび割れ追従性はE4(1.12mm)>E3(0.97mm)>E5(0.94mm)>E2(0.90mm)>E1(0.76mm)>E6(0.60mm)となり、膜厚よりも適用する主材の性能が大きく影響している結果となった。ただ、主材が同じであれば、ひび割れ追従性は膜厚の効果が大きく影響する⁹⁾。いずれにしても初期性能値としては問題のない値である。

変性アクリル系の2工法では、MA2が0.79mmで0.80mmには若干及ばなかったが、この工法はそれぞれ仕上げ材(MA1:ウレタン樹脂系, MA2:ふっ素樹脂系)が異なり、その差が現れたものと思われる。

クロロプレンゴム系の2工法については、主材の膜厚ではR2(465 μm)の方がR1(265 μm)より厚いが、仕上げ材の厚いR1の方がより良い結果を示している(R1:70 μm , R2:60 μm)。

ウレアウレタン系のU1は主材層が最大の2250 μm であり、予想通り15工法中最大値を示した。膜厚による効果に加え、伸び性能に秀でたウレアウレタン系の良さが確認できる。

ポリマーセメント系の4工法については、全体をポリマーセメント系で仕上げたC1が最も小さい値を示したが、初期値としては問題のない値であり、ポリマーセメントの柔軟化が顕著に現れている。

15工法のひび割れ追従性は、何れの工法も特に問題のない性能を示している。

6.4 屋外暴露耐候性試験後のひび割れ追従性

6.3節にて得られた結果を基本とし、屋外暴露耐候性試験後のひび割れ追従性に関する耐久性について述べる。

6.4.1 試験実施工法

今回試験に供した工法は、第5章で検討したものと同一の10工法とした。なお、使用している主材は以下に示す4種類である。

- ① エポキシ樹脂系（柔軟形を含む） 4工法
- ② クロロプレンゴム系 2工法
- ③ ウレアウレタン系 1工法
- ④ ポリマーセメント系（柔軟形を含む） 3工法

水セメント比50%、砂セメント比3のモルタルを、内のり120mm×40mm×10mmの型枠を用いて成型したモルタル板（日本テストパネル㈱にて一括作製）に表6.4.1.1に示す10工法を所定の施工方法に従って施したものを試験片として試験に供する。

表 6.4.1.1 試験に供した表面被覆工法一覧

工法	主材（膜厚：μm）	仕上げ材（上塗材）[膜厚：μm]
E1	エポキシ樹脂系（160μm）	柔軟形ウレタン樹脂系（30μm）
E4	エポキシ樹脂系（320μm）	柔軟形ふっ素樹脂系（30μm）
E5	エポキシ樹脂系（1000μm）	ふっ素樹脂系（38μm）
E6	柔軟形エポキシ樹脂系（200μm）	アクリルウレタン系（30μm）
R1	クロロプレンゴム系（265μm）	クロロスルフォン化 ポリエチレンゴム系（70μm）
R2	クロロプレンゴム系（465μm）	ハルスハイブリッド系（60μm） [クロロスルフォン化ポリエチレンゴム]
U1	ウレアウレタン系（2250μm）	アクリルウレタン系（80μm）
C1	ポリマーセメント系（465μm） [アクリルエマルジョン]	ポリマーセメント系（1050μm） [アクリルエマルジョン]
C2	ポリマーセメント系（660μm） [アクリルエマルジョン]	アクリルシリコン系（75μm）
C3	ポリマーセメント系（660μm） [アクリルエマルジョン]	アクリルシリコン系（75μm）

6.4.2 暴露試験

屋外暴露耐候性試験は、各メーカーの塗装仕様に従って作製した試験片を、わが国を代表する標準的な暴露場で、本州中部の表日本気候区を代表する暴露試験場である、一般財団法人 日本ウエザリングテストセンター 銚子暴露試験場（北緯：35°43′，東経：140°45′）にて実施している。

6.4.3 試験方法

該当年数（1年・3年・5年）の屋外暴露耐候性試験終了後、一般財団法人 日本ウエザリングテストセンター 銚子暴露試験場より試験片を回収し、土木学会規準 JSCE-K-532-2010

表面被覆材のひび割れ追従性試験方法によってひび割れ追従性試験を行う。なお，試験実施環境は， $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ とした。

6.4.4 試験結果および考察

今回試験に供した 10 工法について，屋外暴露耐候性試験終了後におけるひび割れ追従性の試験結果をエポキシ系 E1・E4・E5・E6 については図 6.4.4.1 に，クロロプレンゴム系 R1・R2，およびウレアウレタン系 U1 を図 6.4.4.2 に，ポリマーセメント系 C1・C2・C3 を図 6.4.4.3 に示す。

一部の工法（エポキシ系 E5：厚膜系）を除き，初期値に比べて暴露年数を経る毎にひび割れ追従性能は低下傾向にあることがわかる。中でもウレアウレタン系の U1 の低下傾向は著しい。以下に主材の種類別に述べる。

・エポキシ系

柔軟形エポキシ樹脂を使用した E6 のみが，暴露 1 年後から 0.40mm を下回っており，屋外暴露による劣化傾向を示している。E6 以外は仕上げ材に柔軟型ウレタンやふっ素（柔軟型ふっ素を含む）を使用しており，ある程度の伸びが維持されているが，E6 はアクリルウレタン系であるものの，前述の樹脂系に比べて屋外暴露耐候性が劣る結果である。また，特に伸びが要求される場合の基準とされている 0.80mm に対しては，柔軟形ふっ素を仕上げ材に用いた E4 は暴露 1 年後まで満足している。しかし，暴露 5 年後までクリアーしているのは主材層が $1000\mu\text{m}$ の E5 のみである。暴露 5 年後でもその性能は維持されている。

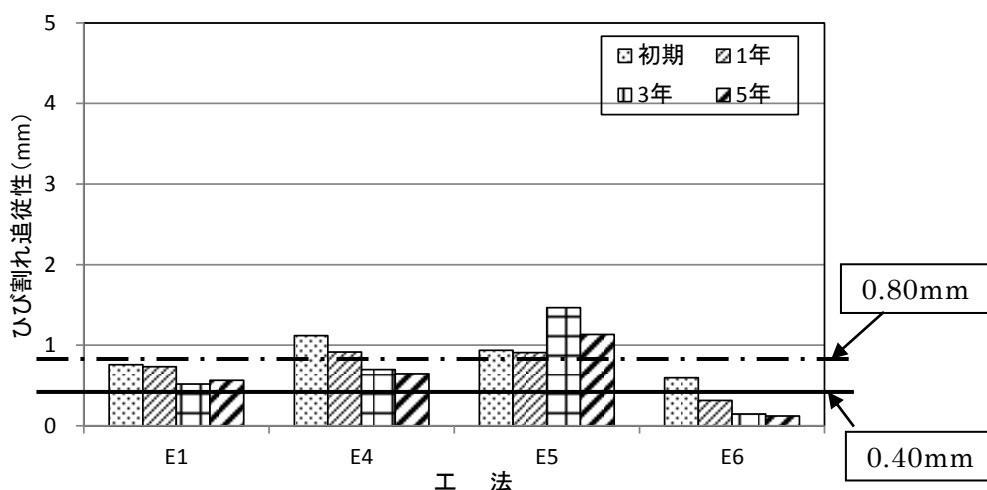


図 6.4.4.1 ひび割れ追従性経時変化（E1・E4・E5・E6）

・クロロプレンゴム系

クロロプレンゴム系 R1・R2 とも，0.40mm および 0.80mm をクリアーしている。仕上げ材にクロロスルホン化ポリエチレンゴムを使用している R1 は，暴露 5 年後でも十分な性能を維持している。しかし，R2 は仕上げ材としてハルスハイブリッド^{注1)}を使用しており，通常では問題ないものの，伸びを要求される場合では閾値あたりでの性能を維持している。

注 1)：紫外線吸収性基と紫外線安定性基（ハルス*）を化学的に樹脂骨格に組み込んだアクリル樹脂

したのは C3 のみである．C2 と C3 は仕上げ材に同じアクリルシリコン系を使用し，主材は同じアクリルエマルジョンタイプのポリマーセメント系ではあるが，製品自体が異なるためか，C3 での主材と仕上げ材の組み合わせの方が経年による影響が少ない結果となっている．

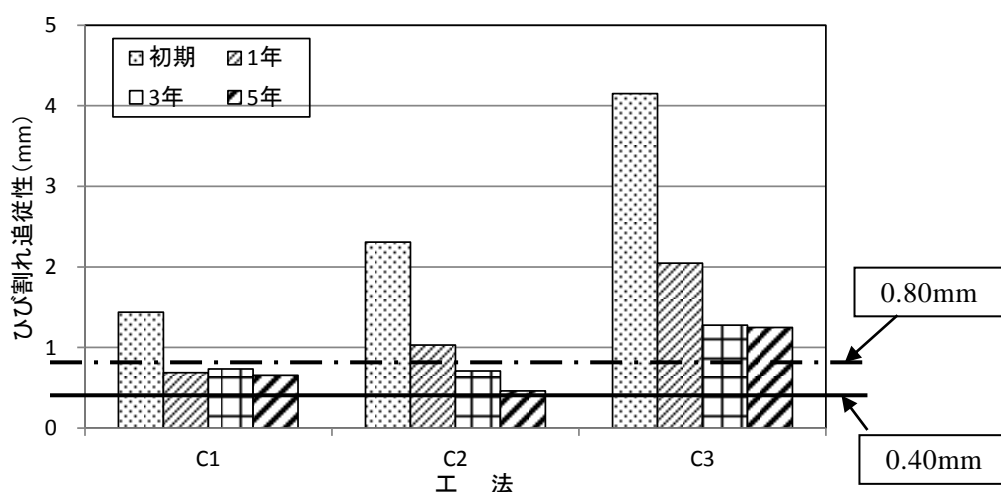


図 6.4.4.3 ひび割れ追従性経時変化 (C1・C2・C3)

不織布，3 軸ビニロンメッシュ繊維，ふっ素フィルムの 3 層構造からなるハイブリッドシートを用いたシート工法を採用しているエポキシ系 E5 以外は，屋外暴露により継続的な性能低下を示している．クロロプレンゴム系の工法は，主材層が同じ樹脂系であっても，組み合わせる仕上げ材の種類や膜厚によって，屋外暴露によるひび割れ追従性の低下度合いが異なることが判明した．また，ポリマーセメント系では，同じアクリルエマルジョンタイプではあるが，ひび割れ追従性の低下度合いが異なる．次に，今回試験に供した全 10 工法について，ひび割れ追従性の経時変化を図 6.4.4.4 に示す．

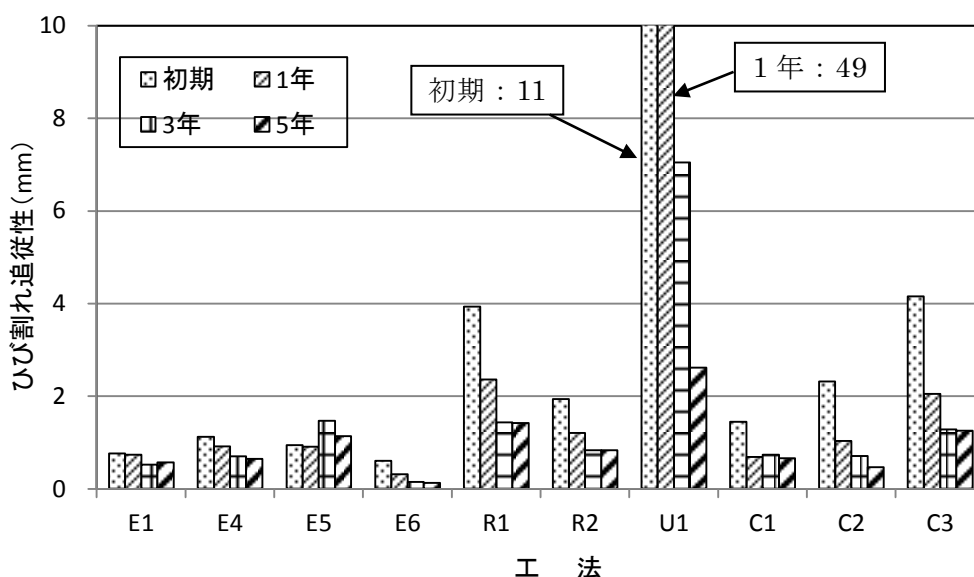


図 6.4.4.4 屋外暴露によるひび割れ追従性の経時変化

5 年間の屋外暴露耐候性後のひび割れ追従性を経時的にみてみると，それぞれ使用する樹

脂系や種類によって性能値は異なるものの、経時的に低下傾向を示している工法が 10 工法中 8 工法となった。エポキシ系 E5 では 3 年後で一時上昇したものの、5 年後では再度低下傾向にある。また、ポリマーセメント系 C1 も同様な傾向を示し、経時的に低下傾向を示している。屋外暴露による紫外線や水分等の影響を受け、経時的に躯体のひび割れに対する抵抗性が低下していることがわかる。この経時的な性能値の低下傾向は、第 4 章で述べた付着性ではあまり顕著ではなかったが、ひび割れ追従性では屋外暴露による塗装系の劣化傾向が顕著に現れている。

以上の結果を踏まえ、屋外暴露耐候性試験での性能値を室内で再現する場合、どのような促進劣化手法が有効であるかを検討した結果を次節で述べる。

6.5 ひび割れ追従性の耐久性評価

各塗装仕様に従って作製された試験片を用い、第 5 章で示した 2 種類の促進劣化試験（促進耐候性試験、耐久性サイクル試験）を行う。促進劣化試験終了後の試験片を用いてひび割れ追従性試験を行い、その結果より促進劣化試験の有用性および屋外暴露耐候性試験との関係について述べる。

6.5.1 試験実施工法

今回試験に供した工法は、第 5 章および第 6 章 6.4 節での検討と同様の 10 工法である。

- ① エポキシ樹脂系（柔軟形を含む） 4 工法
- ② クロロプレンゴム系 2 工法
- ③ ウレアウレタン系 1 工法
- ④ ポリマーセメント系（アクリルエマルジョン系）[柔軟形を含む] 3 工法

モルタル板（120mm×40mm×10mm）に表 6.4.1.1 に示す 10 工法を所定の施工方法に従って施したものを試験片として試験に供する。

6.5.2 促進劣化試験

今回促進劣化試験方法としては、前出の第 5 章で実施した以下に示す 2 種類の試験方法を実施する。

(1) 促進耐候性試験

屋外での暴露試験条件に近い劣化形態を示す可能性が高く、相関性も期待できるキセノンランプによる促進耐候性試験（JIS K 5600-7-7：1999 に示すサイクル A[ぬれ時間：120 分中 18 分、乾燥期間中の相対湿度：40～60%]）を行う。

(2) 耐久性サイクル試験

湿潤状態、低温状態、高温状態を一定サイクル繰り返す耐久性試験（JIS A 6909：2003 追補 1：2006 追補 2：210 建築用仕上塗材および JIS A 6916：2000 追補 1：2006 建築用下地調整塗材の耐久性能を評価する項目）に、キセノンランプによる促進耐候性試験を組み合わせることで、複合的な劣化を想定した耐久性サイクル試験を行う。

試験条件を以下に示す。

①キセノンランプによる促進耐候性試験 72 時間

↓

②水中に 18 時間浸せき（浸せき層を設置した室内環境：23±2℃，50±5%）← 24 時間

↓

③-20℃で 3 時間静置（恒温槽設置の室内環境：設定なし）

↓

④50℃で 3 時間静置（恒温槽設置の室内環境：設定なし）

①の促進耐候性試験を 72 時間実施した後，②～④の湿潤冷熱繰り返し試験を 4 回繰り返し，
たものを 1 サイクル（168 時間）とし，合計 10 サイクル（1680 時間）行う。

6.5.3 試験結果および考察

(1) 促進耐候性試験

今回試験に供した 10 工法について，初期値を含めて促進耐候性試験後のひび割れ追従性について分散分析を行ったところ，危険率 5%において工法間での有意差は認められたが，経時による有意差は認められなかった。分散分析表を表 6.5.3.1 に示す。

表 6.5.3.1 促進耐候性試験に関する分散分析表

変動要因	変 動	自由度	分 散	観測された分散比	F (0.05)
工 法	48.888	9	5.432	2.475	2.250
経 時	16.920	3	5.640	2.570	2.960
誤 差	59.261	27	2.195		
合 計	125.069	39			

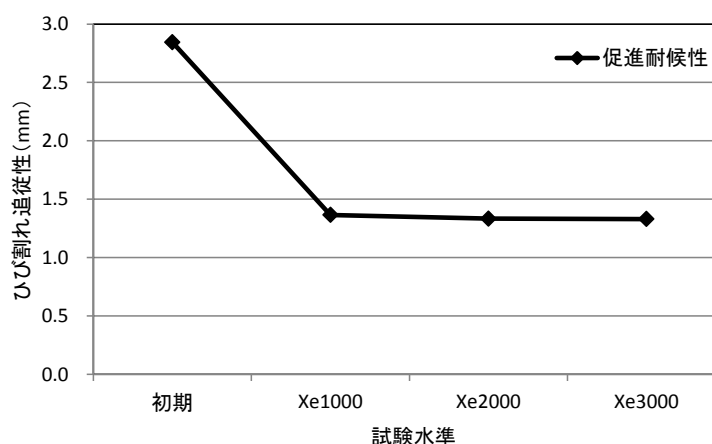


図 6.5.3.1 促進耐候性試験後のひび割れ追従性試験経時変化（平均）

各水準の平均値は，初期値：2.84 が，キセノン 1000 時間：1.37，キセノン 2000 時間：1.33，キセノン 3000 時間：1.33 となり，キセノン 1000 時間後は初期値に比べ半分以上に低下している（図 6.5.3.1）。しかし，更なる照射時間の増加に対してひび割れ追従性の低下はみられない状況であり，経時による有意差が認められなかった。キセノンの照射効果が仕上げ材（上

塗り)に留まり、主材層に及んでいないことが伺える。

促進耐候性試験（キセノン照射 1000 時間、2000 時間、3000 時間）後におけるひび割れ追従性の試験結果をエポキシ系 E1・E4・E5・E6 については図 6.5.3.2 に、クロロプレンゴム系 R1・R2 およびウレアウレタン系 U1 を図 6.5.3.3 に、ポリマーセメント系 C1・C2・C3 を図 6.5.3.4 に示す。

促進耐候性試験後のひび割れ追従性は、シート工法の E5 を除きキセノン照射することで、初期値を下回る傾向を示している。また、キセノン照射時間の経過に伴い、低下傾向を示している工法や、初期値は下回っているが、基準値である 0.40mm を維持している工法がある。

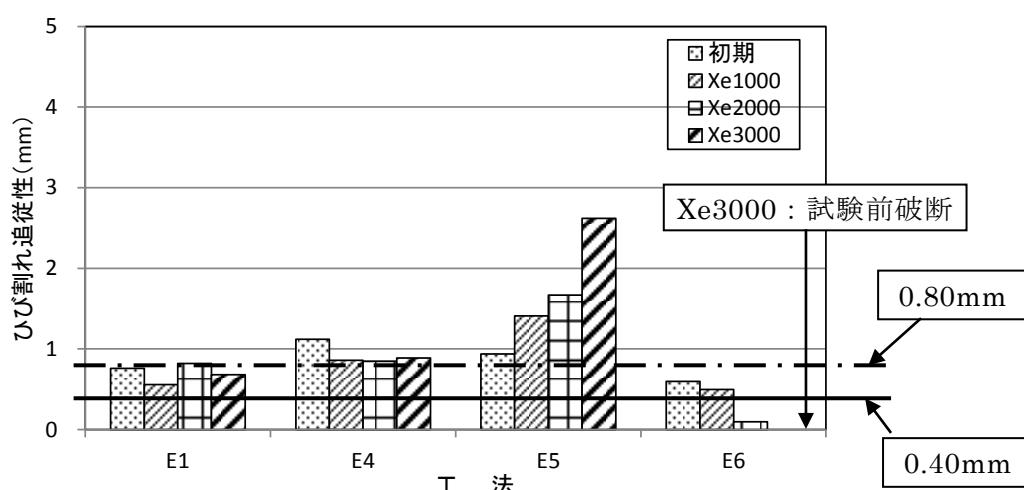


図 6.5.3.2 ひび割れ追従性経時変化 (E1・E4・E5・E6)

主材の種類別でみると、エポキシ系では柔軟形エポキシ樹脂+アクリルウレタン系の E6 を除き、0.40mm を満足している。E6 はキセノン 1000 時間までは 0.40mm を満足しているが、キセノン 2000 時間では 0.10mm、キセノン 3000 時間ではひび割れ追従性試験を実施する前（キセノン照射 3000 時間終了時点）に塗膜破断を起こし、ひび割れ追従性試験は行えなかった。

クロロプレンゴム系 R1・R2 とともに屋外暴露試験同様、0.40mm および 0.80mm を満足している。仕上げ材に膜厚が厚い R1 の方がひび割れ追従性は高いが、紫外線に対する耐久性が期待できるハルスハイブリッドを使用した R2 は、初期値からの低下度合いは R1 に比べて低く、十分なひび割れ追従性能を示している。

ウレアウレタン系 U1 はひび割れ追従性としては特に問題ないものの、キセノン照射の経時による低下傾向が著しく、キセノン照射 1000 時間後では 2.3mm、キセノン照射 2000 時間では 1.6mm、キセノン照射 3000 時間では 1.5mm まで低下している。第 4 章で述べた見かけのはく離抵抗性と同様、屋外暴露の経年による劣化が著しい一例である。

ポリマーセメント系では、C1 を除き 0.40mm（標準）および 0.80mm（伸びを要求される場合）を満足している。6.4 節の屋外暴露による経時変化と同様、C2 と C3 は仕上げ材に同じアクリルシリコン系を使用し、主材はアクリルエマルジョンタイプのポリマーセメント系ではあるが、製品の異なるポリマーセメントを使用しているためか、C3 の方が主材と仕上げ材

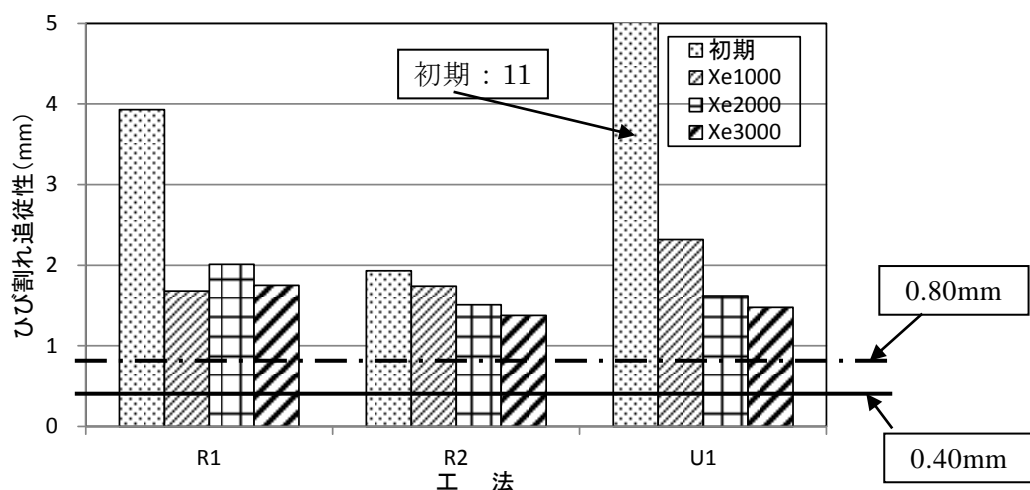


図 6.5.3.3 ひび割れ追従性経時変化 (R1・R2・U1)

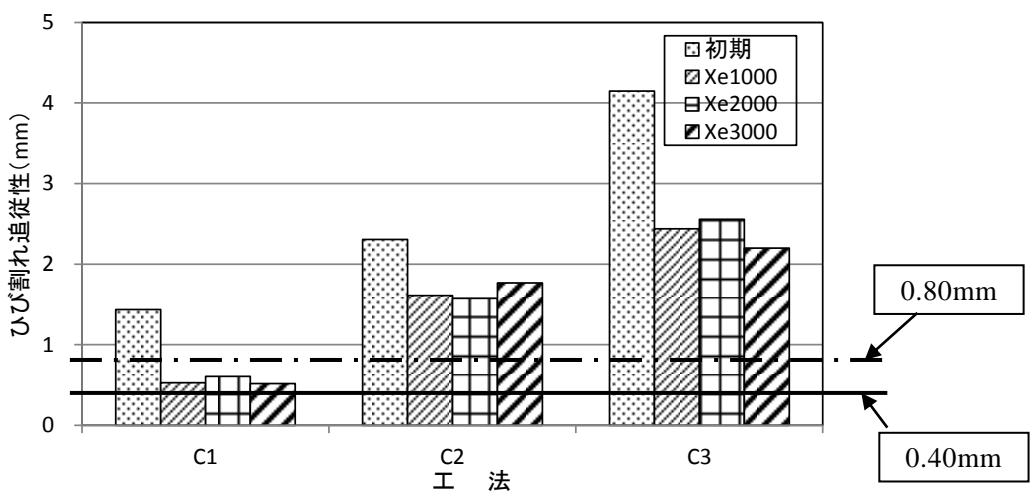


図 6.5.3.4 ひび割れ追従性経時変化 (C1・C2・C3)

との組み合わせでは、キセノン照射による影響は少ない。

以上、促進耐候性試験後のひび割れ追従性は、増加傾向を示した E5 を除き、キセノン照射することで初期値を下回る傾向を示した。これは屋外暴露試験同様、塗装系の劣化状況を再現している。特にウレアウレタン系の低下傾向は著しく、第 4 章の見かけのはく離抵抗性で見られた屋外暴露による経年劣化と同様の傾向を示した。また、ポリマーセメント系では、仕上げ材が同じでも主材のポリマーセメントによってひび割れ追従性の低下度合いが異なる場合もあった。なお、不織布、3 軸ビニロンメッシュ繊維、ふっ素フィルムの 3 層構造をもつ E5 が、促進耐候性試験でなぜ増加傾向を示したかは解明に至らなかった。

(2) 耐久性サイクル試験

今回試験に供した 10 工法について、初期値を含め、促進耐候性試験後のひび割れ追従性について分散分析を行ったところ、危険率 5%において工法間および経時で有意差が認められた (表 6.5.3.2)。各水準の平均値は、初期値:2.84 が、7 サイクル:1.05、10 サイクル:0.86、となり、促進耐候性試験であるキセノン照射に比べてひび割れ追従性の低下傾向を示したこ

とによる（図 6.5.3.5）.

表 6.5.3.2 促進耐候性試験に関する分散分析表

変動要因	変 動	自由度	分 散	観測された分散比	F (0.05)
工 法	63.171	9	7.019	2.949	2.456
経 時	23.930	2	11.965	5.027	3.555
誤 差	42.840	18	2.380		
合 計	129.941	29			

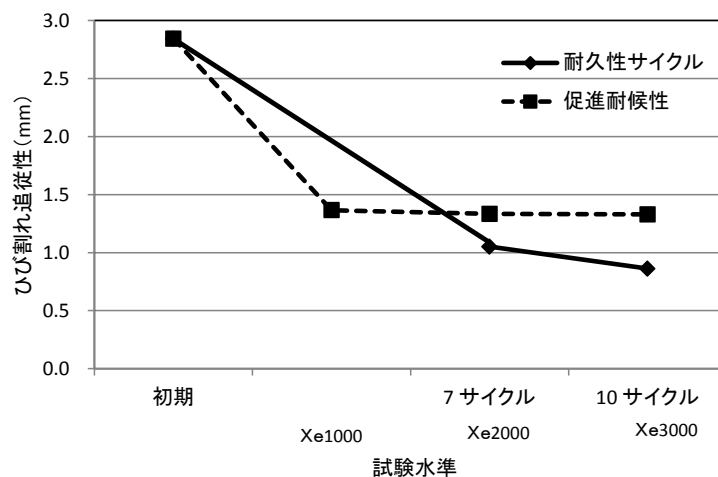


図 6.5.3.5 耐久性サイクルおよび促進耐候性試験後のひび割れ追従性試験経時変化（平均）

耐久性サイクル試験（7 サイクル，10 サイクル）後のひび割れ追従性の試験結果をエポキシ系 E1・E4・E5・E6 については図 6.5.3.6 に，クロロプレンゴム系 R1・R2 およびウレアウレタン系 U1 を図 6.5.3.7 に，ポリマーセメント系 C1・C2・C3 を図 6.5.3.8 に示す。

前出(1)の促進耐候性試験後では，エポキシ系 E5 はひび割れ追従性が経時的に増加傾向にあったが，耐久性サイクル試験後では全て初期値を下回り，一部サイクル数による差が認められない工法もあるが，ほとんどの工法で経時的に低下傾向を示している。

主材の種類別でみると，エポキシ系では，促進耐候性試験後と同様に E6 は耐久性サイクル試験の各サイクル終了時点で塗膜破断を起こしひび割れ追従性試験は実施できなかった。また，促進耐候性試験後では 0.40mm を満足できなかった工法は E6 のみであったが，耐久性サイクル試験後では E6 に加え E1 も満足できず，伸びを要求される場合の 0.80mm を満足する工法はなかった。耐久性サイクル試験は，キセノン照射（降雨状況を含む）だけの促進耐候性試験に比べ，水中浸漬である湿潤環境が加わることおよび 23℃ → -20℃ → 50℃ と変化する温度差等，過酷な劣化環境を作り出していることがわかる。

促進耐候性試験後で 0.40mm（標準）および 0.80mm（伸びを要求される場合）を満足していたクロロプレンゴム系では，仕上げ材の膜厚が厚い R1 は満足したものの，R2 では 0.80mm を上回ることができなかった。ただ，紫外線に対する耐久性が期待できるハルスハイブリッドを使用した R2 は，10 サイクル後では湿潤・温度差による劣化傾向が強く表れているが，標準（0.40mm）では特に問題なく十分なひび割れ追従性能を示している。

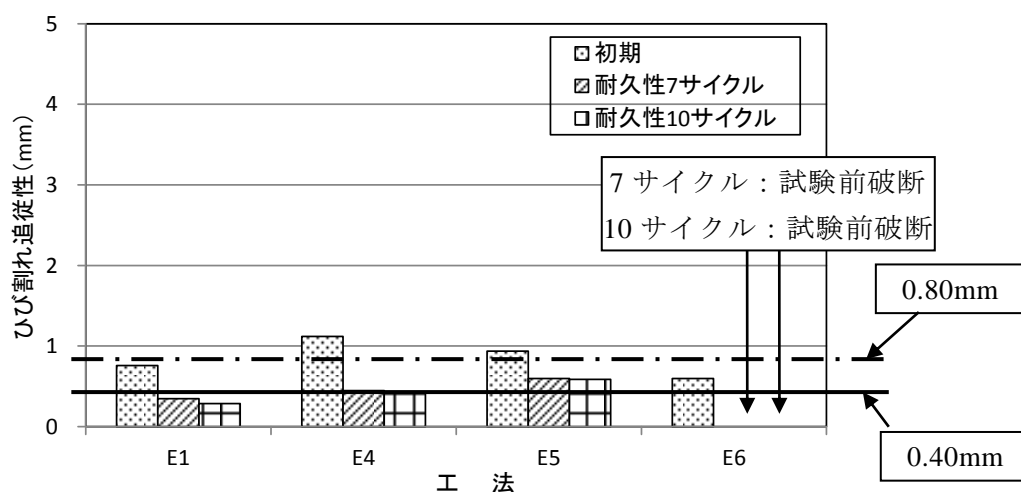


図 6.5.3.6 ひび割れ追従性経時変化 (E1・E4・E5・E6)

ウレアウレタン系 U1 は促進耐候性試験後同様，耐久性サイクル試験を行うことで性能は著しく低下し，サイクル数の増加に伴ってひび割れ追従性は低下している．ひび割れ追従性として現時点では特に問題ないが，7 サイクル終了時で 2.4mm，10 サイクル終了時で 1.6mm まで低下し，初期値の 15% 程度になっている．どの程度の期間が必要かは不明であるが，経時による劣化傾向は免れない．第 4 章で述べた見かけのはく離抵抗性と同様，経時による劣化が著しい一例である．

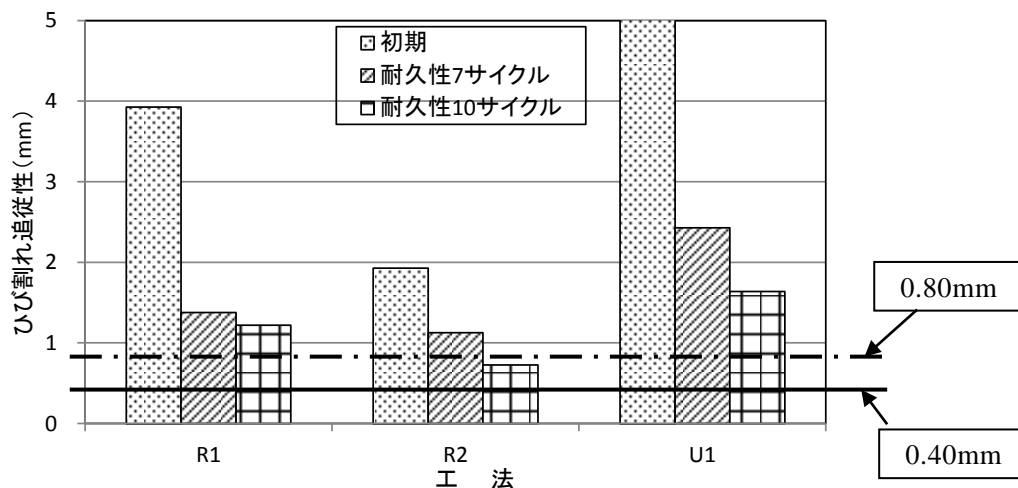


図 6.5.3.7 ひび割れ追従性経時変化 (R1・R2・U1)

ポリマーセメント系では促進耐候性試験後同様，C1 を除き 0.40mm（標準）および 0.80mm（伸びを要求される場合）を満足している．6.4 節の屋外暴露による経時変化と同様，C2 と C3 は仕上げ材に同じアクリルシリコン系，主材はアクリルエマルジョンタイプのポリマーセメント系ではあるが，製品の異なるポリマーセメントを使用しているためか，C3 の方が主材と仕上げ材との組み合わせでは，耐久性サイクル試験による影響は少ない．

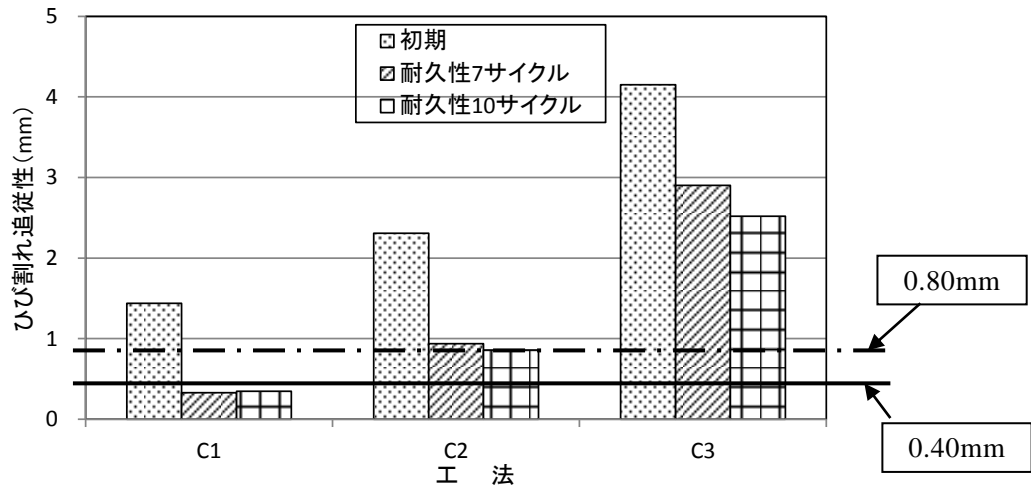


図 6.5.3.8 ひび割れ追従性経時変化 (C1・C2・C3)

以上, 耐久性サイクル試験後のひび割れ追従性は, どの工法も初期値を下回る傾向を示し, 屋外暴露試験同様, ひび割れ追従性の低下傾向を再現している. 促進耐候性試験同様, 特にウレアウレタン系の低下傾向は著しく, 第4章の見かけのはく離抵抗性でみられた屋外暴露による経年劣化と同様の傾向を示した.

(3) 促進耐候性試験と耐久性サイクル試験の比較

今回試験に供した全 10 工法について 2 種類 (促進耐候性試験, 耐久性サイクル試験) の促進劣化試験を実施し, それぞれのひび割れ追従性を評価した. 各促進劣化試験における全工法のひび割れ追従性の経時変化を図 6.5.3.7 (促進耐候性) および図 6.5.3.8 (耐久性サイクル) に示す.

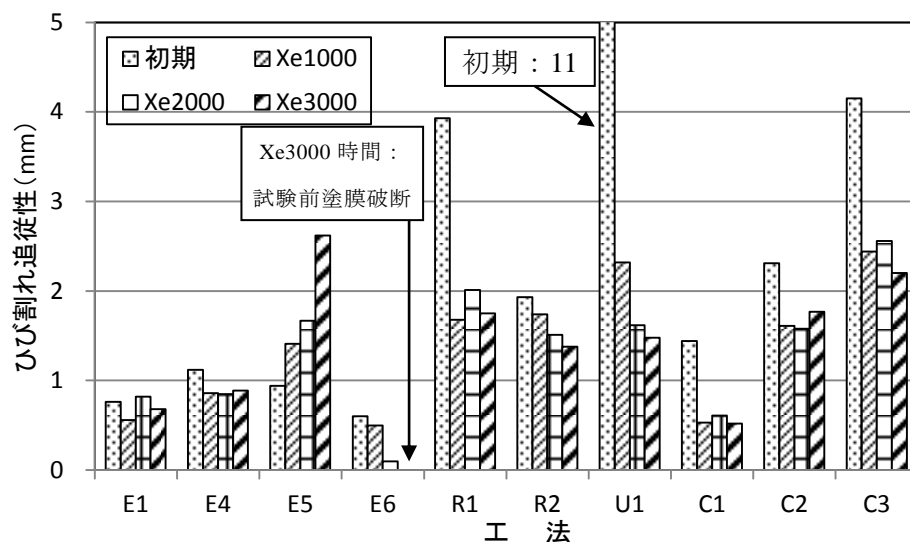


図 6.5.3.7 促進耐候性後のひび割れ追従性の経時変化

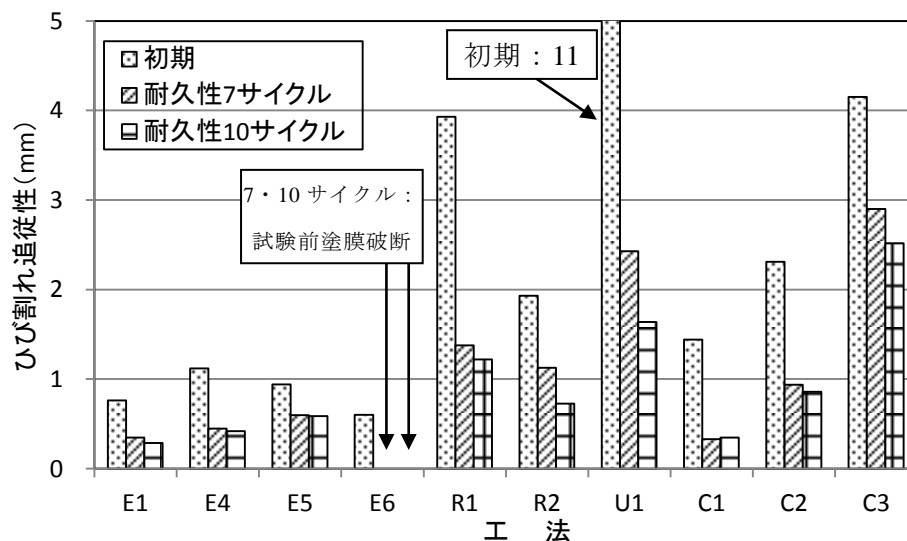


図 6.5.3.8 耐久性サイクル後のひび割れ追従性の経時変化

促進劣化試験としての促進耐候性試験（キセノン照射 1000～3000 時間）では、10 工法中 1 工法が初期値を上回り、キセノン照射時間が増すごとにひび割れ追従性も増加した。初期から経時的にひび割れ追従性が単純に低下しているのは 10 工法中 3 工法、途中増加するが 3000 時間では低下する工法が 4 工法、残りの 2 工法は低下と増加を繰り返す場合である。促進耐候性試験後では、10 工法中 7 工法が経時による低下傾向を示している。

一方、耐久性サイクル試験後では 10 工法中 9 工法が、耐久性サイクル試験を行うことで経時的にひび割れ追従性が単純に低下傾向を示している。耐久性サイクル試験 10 サイクル終了時にひび割れ追従性が若干上昇したポリマーセメント系 C1（7 サイクル時：0.33mm，10 サイクル時：0.35mm）については、その差が 0.02mm であることから、経時における劣化傾向に対して影響は少ないことが解る。

また、6.4 節でも記したように、屋外暴露によるひび割れ追従性の経時変化は、そのほとんどが劣化による低下傾向を示しており、上述の耐久性サイクル試験の経時変化の傾向と一致する。

6.5.4 促進劣化試験と屋外暴露耐候性試験結果との関係

屋外暴露耐候性試験結果と比較した場合、今回実施した 2 種類の促進劣化試験が、どの程度の年数に相当するかを検討する。なお、屋外暴露耐候性試験結果は 5 年目までの試験結果を用い、各促進劣化試験で得られた性能値を示す暴露年数とする。

(1) 促進耐候性試験

初期、屋外暴露耐候性試験 1 年・3 年・5 年および促進劣化試験の促進耐候性試験後のひび割れ追従性試験結果を、図 6.5.4.1 にエポキシ系 E1・E4・E5・E6，図 6.5.4.2 にクロロプレンゴム系 R1・R2 およびウレアウレタン系 U1，図 6.5.4.3 にポリマーセメント系 C1・C2・C3 を示す。

・エポキシ系

仕上げ材に柔軟形ウレタン系を用いた E1 は、キセノン照射 1000 時間では屋外暴露耐候性の 3 年～5 年, キセノン照射 2000 時間ではひび割れ追従性能が上昇したため該当せず. また, キセノン照射 3000 時間では屋外暴露耐候性の 1 年～3 年程度の劣化傾向が推定される.

仕上げ材に柔軟形ふっ素系を用いた E4 は, キセノン照射 1000・2000・3000 時間とも屋外暴露耐候性の 1 年～3 年程度の劣化傾向が推定される.

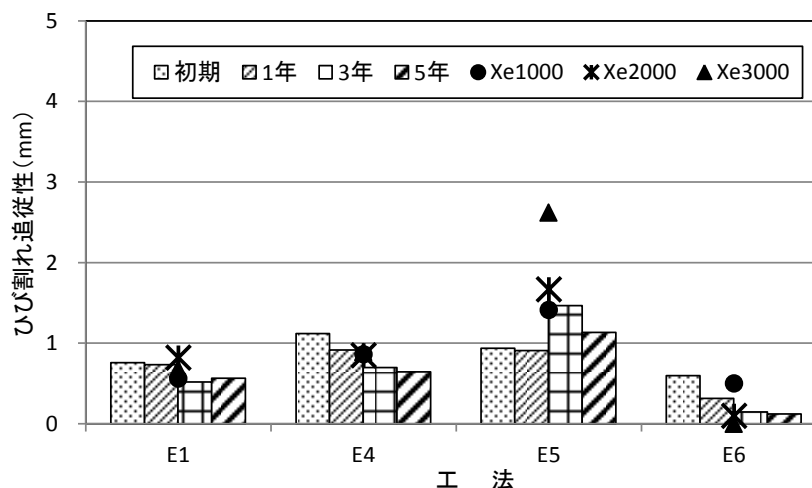


図 6.5.4.1 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後のひび割れ追従性 (E1・E4・E5・E6)

ハイブリッドシート (不織布, 3 軸ビニロンメッシュ繊維, ふっ素フィルムの 3 層構造) を用いたシート工法の E5 は, キセノン照射 1000 時間では屋外暴露耐候性の 3 年程度の劣化傾向が推定されるが, 2000・3000 時間ではひび割れ追従性能が上昇しているため該当せず.

主材に柔軟形エポキシ系, 仕上げ材にアクリルウレタン系を用いた E6 は, キセノン照射 1000 時間では屋外暴露耐候性の 1 年未満程度, 2000 時間では 5 年程度, 3000 時間では塗膜破断を起こしていたため, 少なくとも屋外暴露耐候性の 5 年以上の劣化傾向が推定される.

・クロロプレンゴム系

仕上げ材にクロロスルホン化ポリエチレンゴム系を使用した R1 は, キセノン照射 1000・2000・3000 時間とも屋外暴露耐候性の 1 年～3 年程度の劣化傾向が推定される.

ハルスハイブリッド系を用いた R2 は, キセノン照射 1000・2000 時間では屋外暴露耐候性 1 年未満程度, 3000 時間では 1 年程度の劣化傾向が推定される.

ひび割れ追従性では若干の性能差はあるものの, 仕上げ材がハルスハイブリッド系ではない R1 は, キセノン照射 3000 時間で屋外暴露耐候性 3 年程度までの劣化傾向であるが, ハルスハイブリッドを用いた R2 は, キセノン 3000 時間で屋外暴露耐候性 1 年程度の劣化傾向であり, 長期の暴露結果を得るには更なるキセノン照射が必要である.

・ウレアウレタン系

仕上げ材にアクリルウレタンを用いた U1 は, キセノン照射 1000 時間では屋外暴露耐候性

5 年程度，2000～3000 時間では屋外暴露耐候性の 5 年以上の劣化傾向が推定される．ただ，暴露 1 年後から 3 年および 5 年にかけての低下傾向が著しいため，現時点ではひび割れ追従性としては問題ないものの，今後の経年変化に注意が必要である．

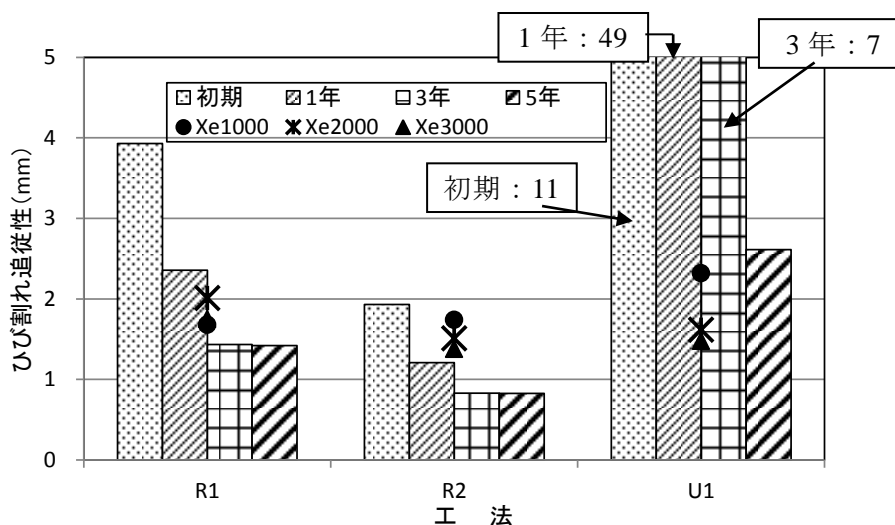


図 6.5.4.2 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後のひび割れ追従性（R1・R2・U1）

・ポリマーセメント系

全体がポリマーセメント系の C1 は，キセノン照射 1000・2000・3000 時間では屋外暴露耐候性の 1 年～5 年程度の劣化傾向が推定される．

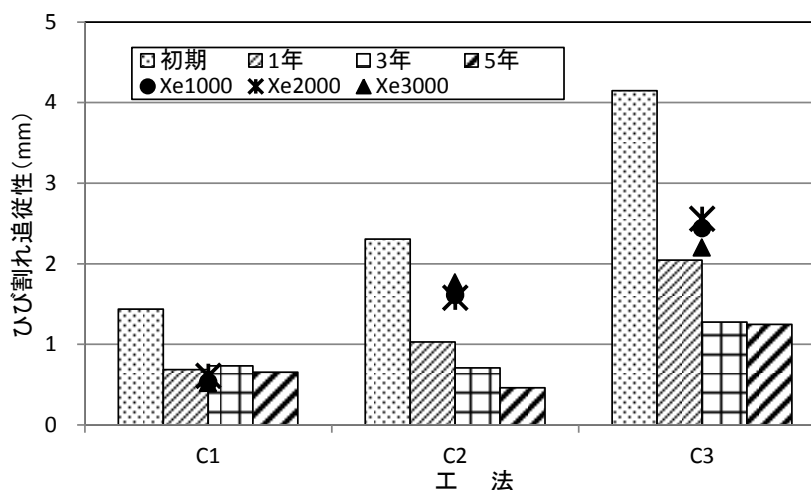


図 6.5.4.3 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後のひび割れ追従性（C1・C2・C3）

仕上げ材にアクリルシリコンを用いた C2 は，キセノン照射 1000・2000・3000 時間とも屋外暴露耐候性の 1 年未満程度の劣化傾向が推定される．

同じく仕上げ材は同じであるが，主材が異なる C3 は，キセノン照射 1000・2000 時間では屋外暴露耐候性の 1 年未満程度，3000 時間では屋外暴露耐候性の 1 年程度の劣化傾向が推定される．

(2) 耐久性サイクル試験

初期、屋外暴露耐候性 1 年・3 年・5 年および促進劣化試験の耐久性サイクル試験後のひび割れ追従性試験結果を、図 6.5.4.4 にエポキシ系 E1・E4・E5・E6、図 6.5.4.5 にクロプロレンゴム系 R1・R2 およびウレアウレタン系 U1、図 6.5.4.6 にポリマーセメント系 C1・C2・C3 を示す。

・エポキシ系

仕上げ材に柔軟形ウレタン系を用いた E1 は、耐久性サイクル試験 7 サイクル・10 サイクルとも屋外暴露耐候性の 5 年以上の劣化傾向が推定される。

仕上げ材に柔軟形ふっ素系を用いた E4 は、耐久性サイクル試験 7 サイクル・10 サイクルとも耐候性の 5 年以上の劣化傾向が推定される。

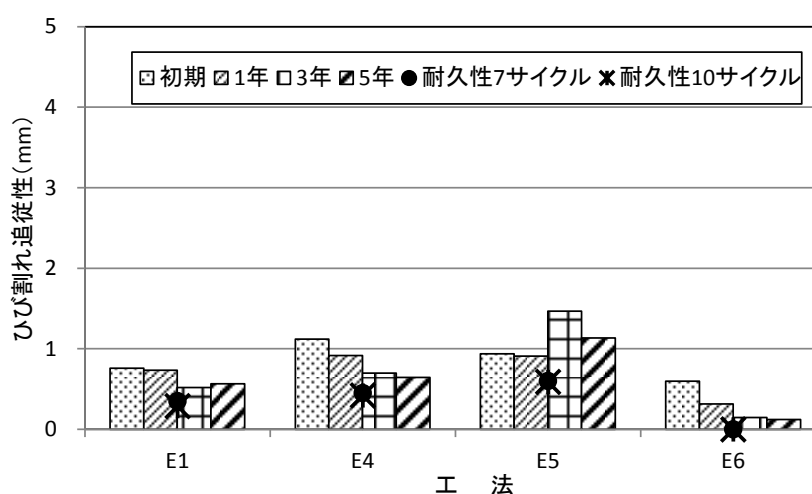


図 6.5.4.4 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後のひび割れ追従性 (E1・E4・E5・E6)

シート工法で仕上げ材にふっ素系を用いた E5 は、屋外暴露耐候性 3 年・5 年でひび割れ追従性能が向上しているため定かではないが、7 サイクル・10 サイクルとも屋外暴露耐候性の 1 年程度の劣化傾向が推定される。

主材に柔軟形エポキシ系、仕上げ材にアクリルウレタン系を用いた E6 は、7 サイクル・10 サイクルとも試験前に塗膜破断を生じており、少なくとも 5 年以上の劣化傾向が推定される。

・クロプロレンゴム系

仕上げ材がハルスハイブリッド系ではない R1 は、耐久性サイクル試験 7 サイクルでは耐候性 3 年～5 年程度、10 サイクルでは 5 年以上の劣化傾向が推定される。

ハルスハイブリッド系を用いた R2 は、耐久性サイクル試験 7 サイクルでは屋外暴露耐候性 1 年～3 年程度、10 サイクルでは 5 年程度の劣化傾向が推定される。

ひび割れ追従性では若干の性能差はあるものの、仕上げ材がハルスハイブリッド系ではない R1 の方が短期間で暴露 3 年後の劣化傾向を示している。しかし、経時的にはハルスハイブリッド系である R2 と同程度のサイクル数で暴露 5 年以上の劣化傾向を示している。

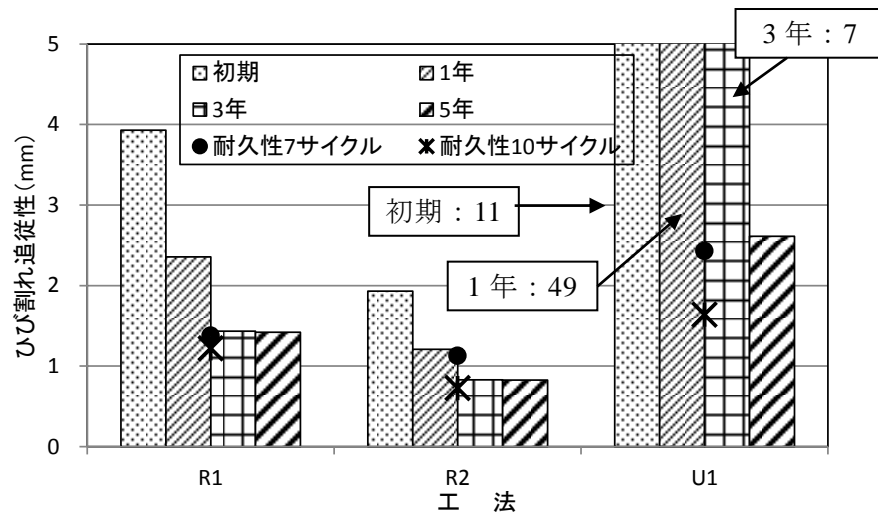


図 6.5.4.5 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後のひび割れ追従性 (R1・R2・U1)

・ウレアウレタン系

仕上げ材にアクリルウレタンを用いた U1 は、耐久性サイクル試験 7 サイクルでは屋外暴露耐候性 5 年程度、10 サイクルでは 5 年以上の劣化傾向が推定される。ただ、暴露 1 年後から 3 年および 5 年にかけての低下傾向が著しいため、現時点ではひび割れ追従性能としては問題ないものの、今後の経年変化に注意が必要である。

・ポリマーセメント系

全体がポリマーセメント系の C1 は、耐久性サイクル試験 7 サイクル・10 サイクルとも屋外暴露耐候性 5 年以上の劣化傾向が推定される。

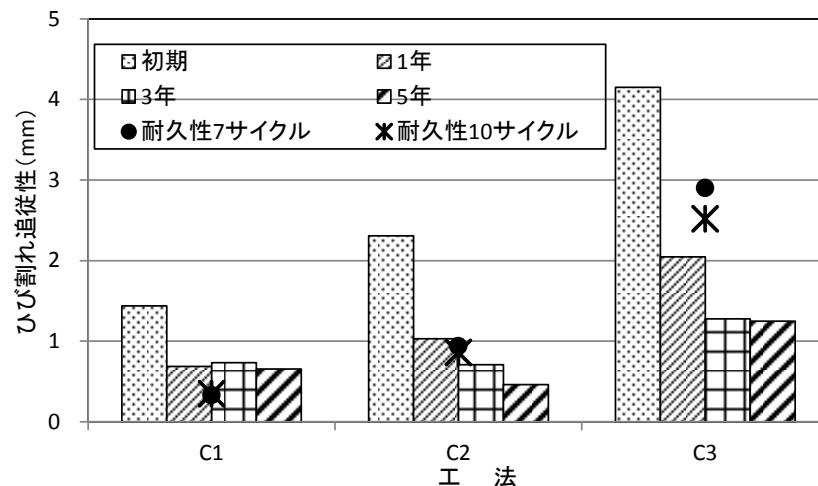


図 6.5.4.6 屋外暴露耐候性と促進劣化試験後のひび割れ追従性 (C1・C2・C3)

仕上げ材にアクリルシリコンを用いた C2 は、耐久性サイクル 7 サイクルでは屋外暴露耐候性 1 年程度、10 サイクルでは 1 年～3 年程度の劣化傾向が推定される。

同じく仕上げ材は同じであるが、主材が異なる C3 は、耐久性サイクル 7 サイクル・10 サイクルとも屋外暴露耐候性 1 年未満の劣化傾向が推定される。

以上、ひび割れ追従性について、2 種類の促進劣化試験（促進耐候性および耐久性サイクル）と屋外暴露耐候性試験での経時変化について検討したところ、促進耐候性では一部劣化傾向が推定できない工法もあったが、キセノン照射時間に対する相当暴露年数の推定が可能であった。一方、耐久性サイクル試験では、全工法で相当暴露年数の推定が可能であった。

(3) 屋外暴露耐候性試験と促進劣化試験の劣化度合い

既に述べたとおり、促進劣化試験および屋外暴露耐候性試験でのひび割れ追従性は、経時による劣化傾向をよくあらわしていることが分かった。そこで、各樹脂系でのひび割れ追従性の低下度合いについて述べる。

それぞれの調査段階が、初期のひび割れ追従性に対してどの程度低下しているかを、エポキシ系を図 6.5.4.7 に、クロロプレンゴム系およびウレアウレタン系を図 6.5.4.8 に、ポリマーセメント系を図 6.5.4.9 に示す。

エポキシ系の E5 については屋外暴露耐候性 3 年・5 年およびキセノン 1000～3000 時間では増加傾向にあるが、耐久性サイクル試験後では低下傾向にある。現状では過酷な条件であるようだが、暴露数年後にはこのような劣化傾向をたどるものと推定される。他の工法については、何れも促進耐候性試験後より耐久性サイクル試験後の方が低下傾向は強く、過酷な試験条件であった。従来から室内試験（標準状態、低温状態、促進耐候性後）では基準値を満足しているが、実構造物では予想に反する期間で塗膜の割れが見られる事例もあり、キセノン照射による塗膜表層部の劣化状況の再現だけでは、実構造物での長期耐久性が評価できていない。今回試みた耐久性サイクル試験 7 サイクルおよび 10 サイクルは苛酷であったが、使用する材料に適したサイクル数を設定することで、長期耐久性の劣化傾向がつかめる可能性が明らかになった。

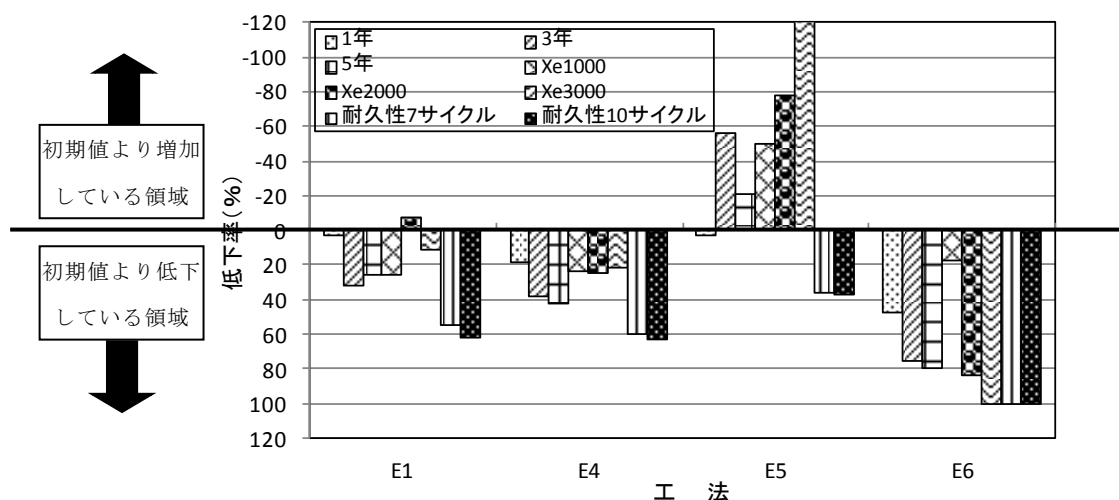


図 6.5.4.7 ひび割れ追従性の低下率（E1・E4・E5・E6）

クロロプレンゴム系 R1・R2 では、エポキシ系と同様に促進耐候性試験後より耐久性サイクル試験後の方が低下率は高い。ただ、仕上げ材の違いにより若干の違いが認められ、R1 に比べ、ハルスハイブリッドを使用している R2 は促進耐候性試験後による劣化度合いが小

さく、ひび割れ追従性は耐久性サイクル試験後に比べ低下率は低い。光安定剤である HALS の効果が表れていることがわかる。

一方、耐久性サイクル試験後では、紫外線による塗膜表層部の劣化にとどまらず、湿潤や温度差による塗装系全体での劣化傾向を示す結果となった。

ウレアウレタン系 U1 は、暴露 1 年後は増加傾向にあったが、促進耐候性試験後および耐久性サイクル試験後共、大幅な低下率を示した。屋外暴露耐候性試験でも 5 年後では大幅な低下率を示していることから、促進耐候性試験および耐久性サイクル試験を行うことで、長期的耐久性の把握が可能であることがわかる。

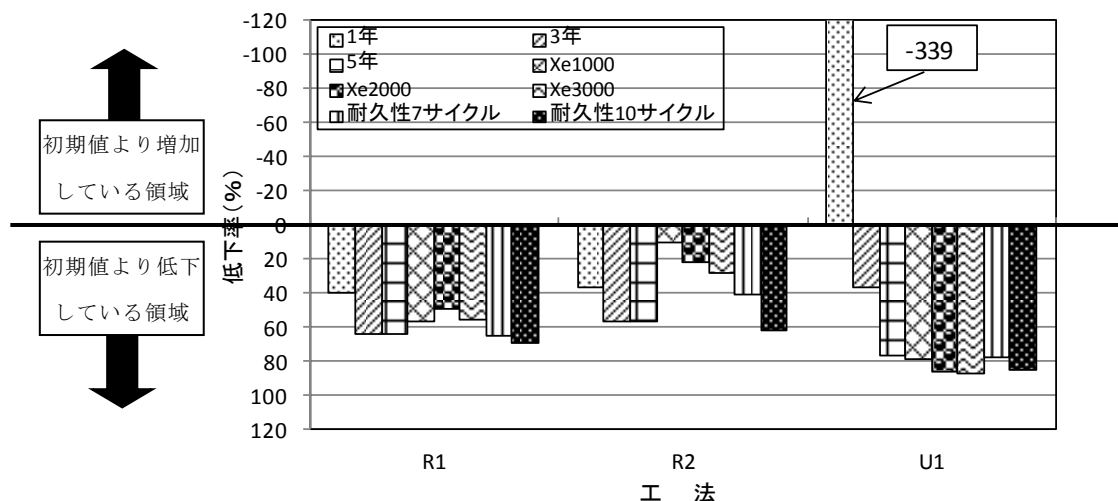


図 6.5.4.8 ひび割れ追従性の低下率 (R1・R2・U1)

ポリマーセメント系 C1 は、紫外線だけでなく湿潤・温度差の影響を大きく受け、最大で 80% 程度の低下率を示している。柔軟性については長期耐久性は望めないようであり、C2 は C3 に比べて湿潤環境や温度差に影響を受けやすい工法であることが分かる。

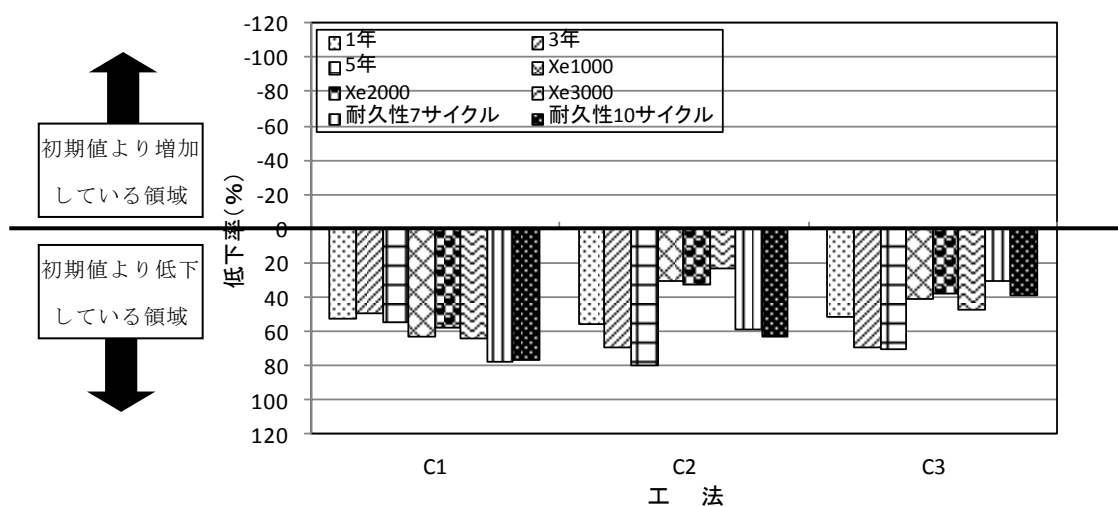


図 6.5.4.9 ひび割れ追従性の低下率 (C1・C2・C3)

以上，促進劣化試験として試みた促進耐候性試験および耐久性サイクル試験共，屋外暴露耐候性試験 5 年以上の性能低下を示す工法もあり，すべてではないが，長期耐久性を把握するための有効な手段の一つとなりうることが判明した。

(4) 屋外暴露耐候性試験との相関性

各促進劣化試験後のひび割れ追従性試験結果と屋外暴露耐候性試験の関係を，6.5.4 項の(3)に示した「低下率」を用いて検討した．屋外暴露耐候性試験（1 年・3 年・5 年）と 2 種類の促進劣化試験（促進耐候性試験および耐久性サイクル試験）の散布図を，それぞれ暴露年数毎に図 6.5.4.10～図 6.5.4.12 に，各々の相関係数を表 6.5.4.1 に示す。

なお，ウレアウレタン系 U1 の屋外暴露耐候性試験 1 年については，データが極端に高いため検討から除外した。

表 6.5.4.1 屋外暴露耐候性と各促進劣化試験の相関係数一覧表

屋外暴露耐候性 (年数)	促進耐候性 (時 間)			耐久性サイクル (サイクル数)	
	1000	2000	3000	7	10
1 年	0.628	0.796	0.665	0.243	0.310
3 年	0.662	0.811	0.886	0.255	0.414
5 年	0.738	0.915	0.891	0.394	0.537

促進劣化試験では，屋外暴露耐候性のどの年数においても，耐久性サイクル試験より促進耐候性試験の方が比較的高い相関係数を示している．各屋外暴露耐候性の年数で最も良い促進耐候性試験時間は，以下のようになった。

- ① 屋外暴露耐候性 1 年：促進耐候性 2000 時間 ($r=0.796$)
- ② 屋外暴露耐候性 3 年：促進耐候性 3000 時間 ($r=0.886$)
- ③ 屋外暴露耐候性 5 年：促進耐候性 2000 時間 ($r=0.915$)

ひび割れ追従性試験は，屋外暴露耐候性試験と促進耐候性試験で良好な相関関係が得られている．一方，湿潤環境や温度変化を取り入れた耐久性サイクル試験では，屋外暴露耐候性 5 年と耐久性サイクル試験 10 サイクルでは $r=0.537$ を示しているものの，どの条件も相関係数が 0.6 以下であり，促進耐候性試験に比べて良好な相関傾向とは言い難い結果である．これは，塗装系内部の劣化を模擬した耐久性サイクル試験に比べ，塗膜表面の主に紫外線に対する劣化を促進させる促進耐候性試験の劣化機構の方が単純と考えられ，ひび割れ追従性試験のように，評価方法が仕上げ材の割れた時点进行评估するのと良好な関係が得られたものと推察する。

第 5 章の付着性に関する促進劣化試験では，促進耐候性試験より耐久性サイクル試験の方が良好な関係が確認できたが，ひび割れ追従性試験については反対の結果となった．表面被覆工法の性能を確認する際は，その目的により確認手法を選ばなければならないことが示唆された。

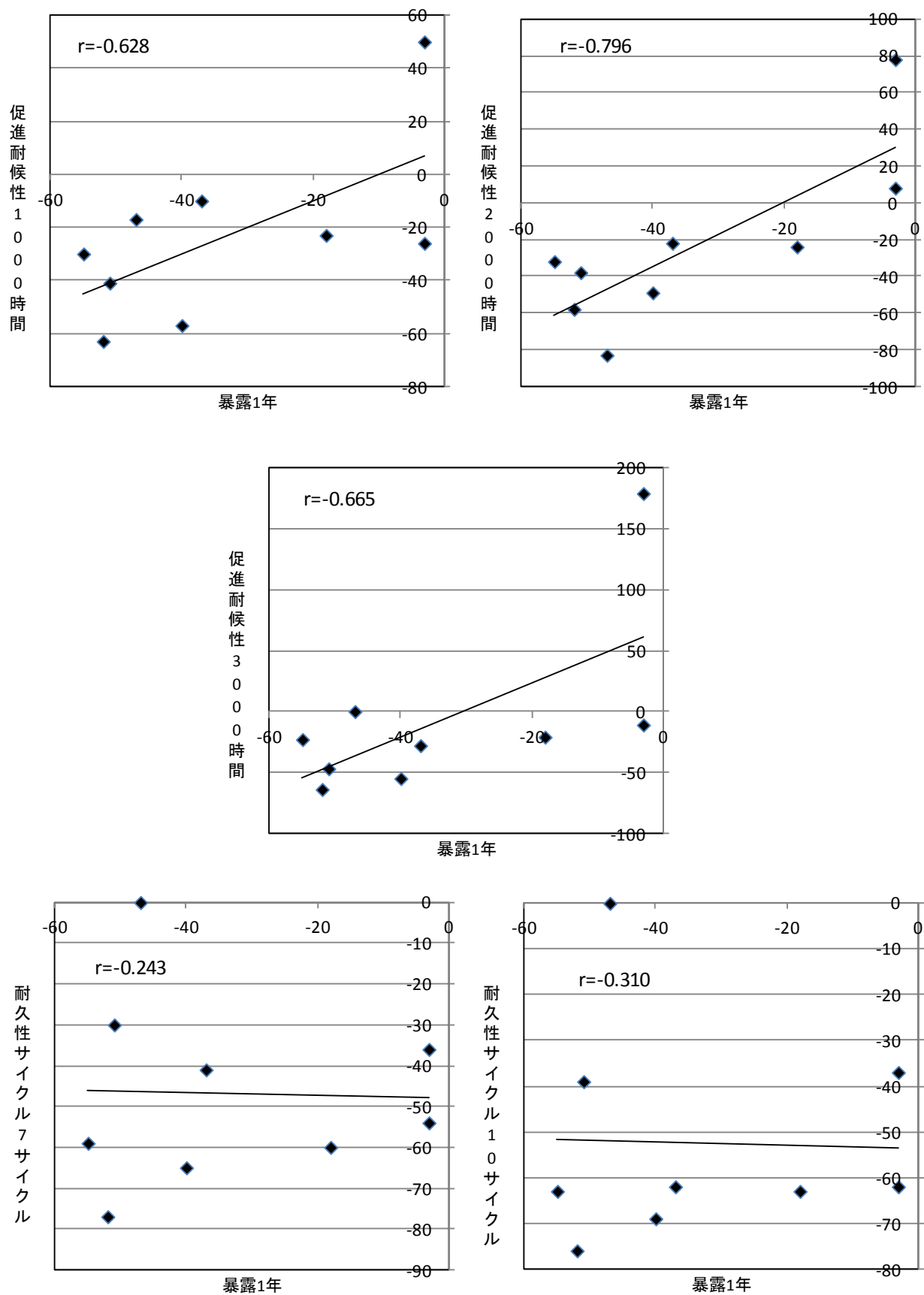


図 6.5.4.10 屋外暴露耐候性試験（1年）と促進耐候性および耐久性サイクル試験の関係

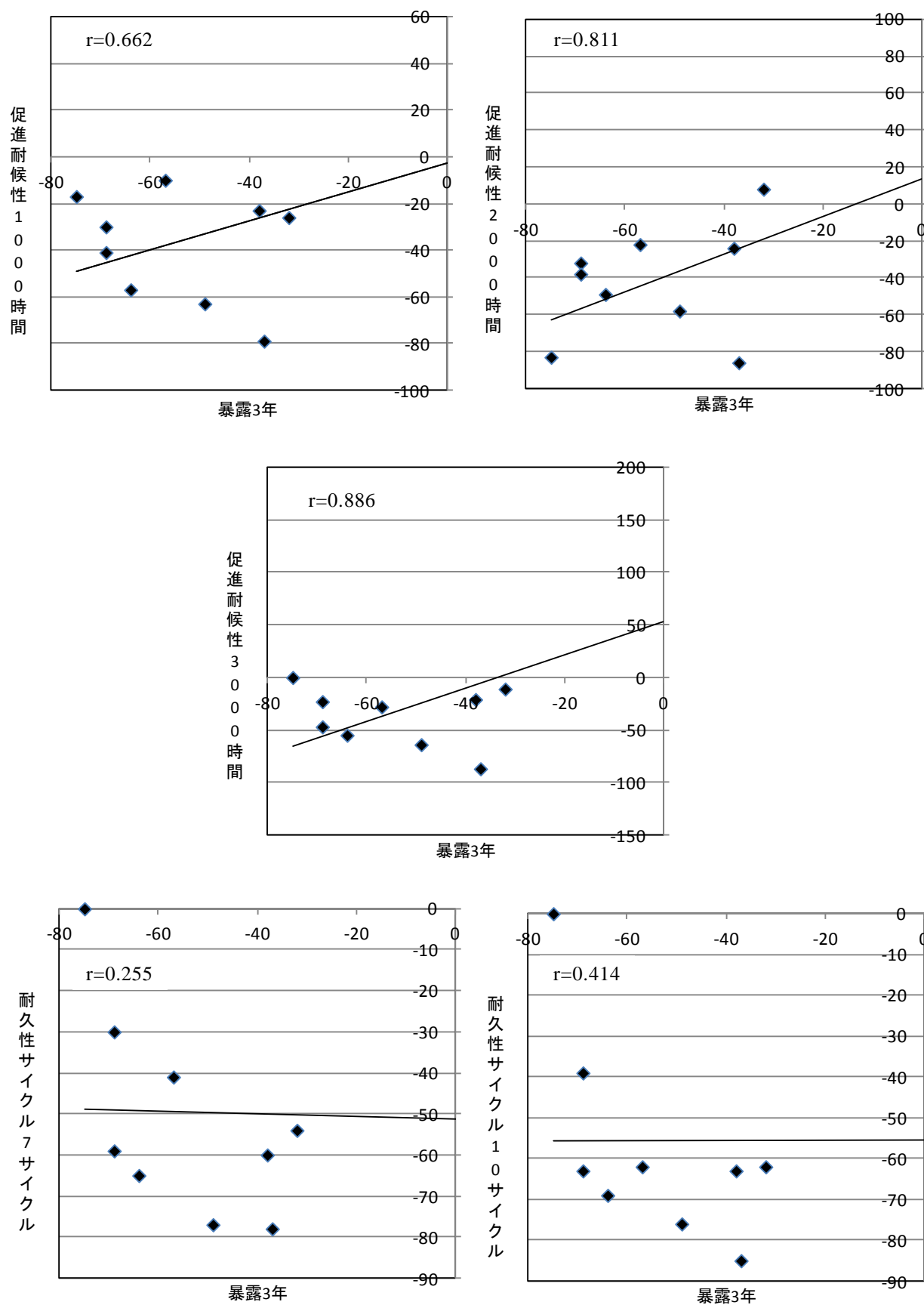


図 6.5.4.11 屋外暴露耐候性試験（3 年）と促進耐候性および耐久性サイクル試験の関係

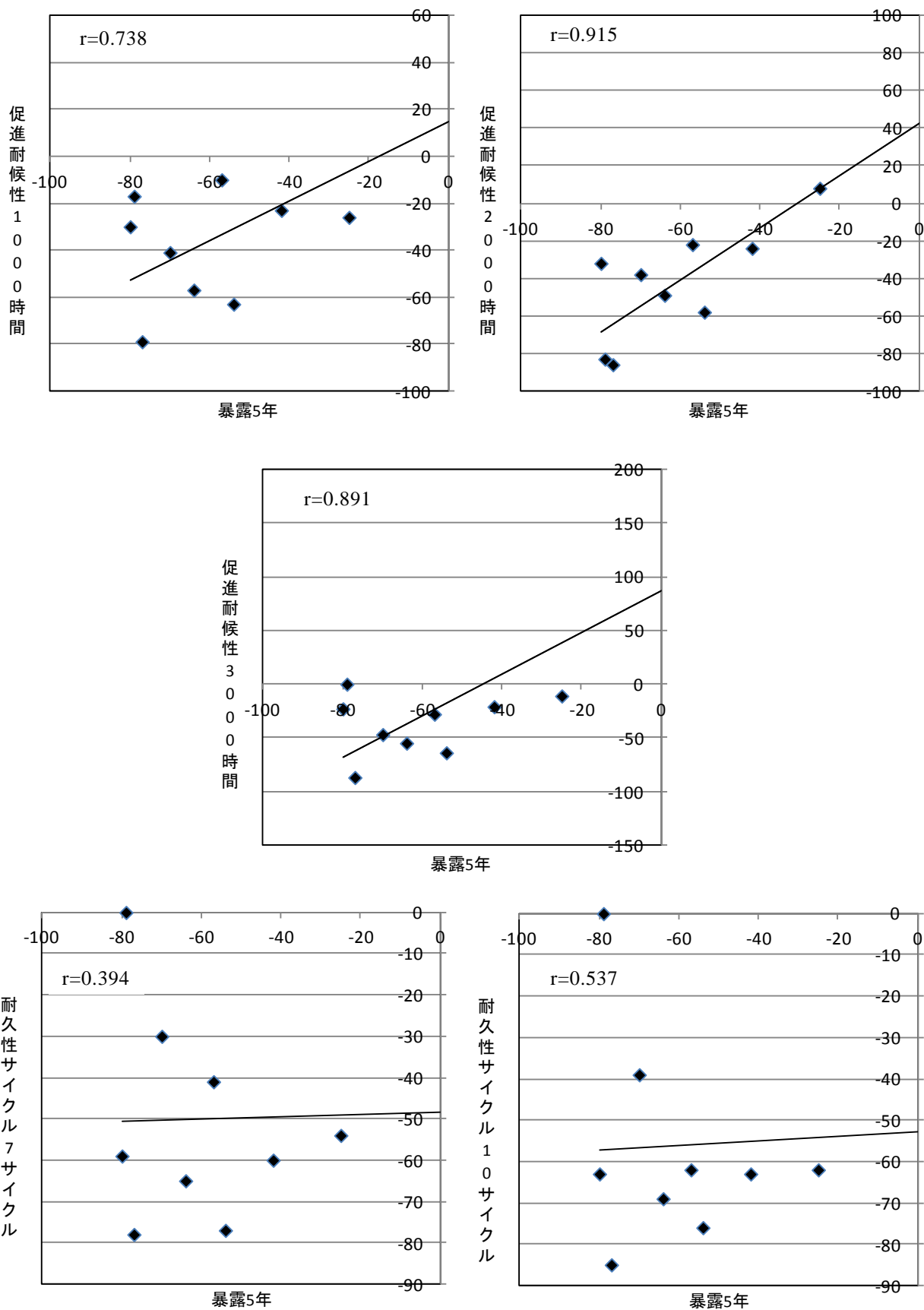


図 6.5.4.12 屋外暴露耐候性試験（5 年）と促進耐候性および耐久性サイクル試験の関係

6.6 まとめ

表面被覆工法に用いられる表面被覆材の耐久性能に重要な役割を果たすひび割れ追従性について、得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 室内試験での初期値として採用した 15 工法は、特に伸びを要求される場合では、一部基準値を満足しない工法があるが、標準では問題のないひび割れ追従性を保持している。
- (2) 5 年間の屋外暴露耐候性後のひび割れ追従性を経時的にみると、それぞれ使用する樹脂系や種類によって性能値は異なるものの、経時的に低下傾向を示している工法が 10 工法中 8 工法となった。一般的には屋外暴露による紫外線や水分等の影響を受け、経時的に躯体のひび割れの拡大に対する抵抗性が低下しているものと考えられる。この経時的な性能の低下傾向は、第 4 章で述べた付着性ではあまり顕著ではなかったが、ひび割れ追従性では屋外暴露による被覆材の劣化傾向が顕著に表れた。
- (3) 屋外暴露耐候性試験での性能値を室内で再現する手法として、促進劣化試験として実施した①促進耐候性試験および②耐久性サイクル試験で得られた結果を以下に記す。

① 促進耐候性試験後

- ・ 10 工法中 1 工法が初期値を上回り、キセノン照射時間が増すごとにひび割れ追従性も増加する傾向が認められた。
- ・ 初期から経時的にひび割れ追従性が単純に低下しているのは 10 工法中 3 工法、他の工法は増加と低下を繰り返しながらも初期値を下回る傾向がみられた。
- ・ 10 工法中 7 工法が経時による低下傾向を示している。

以上より、一部の工法を除きキセノン照射することで、初期値を下回る傾向を示し、屋外暴露試験同様、塗装系の劣化状況を再現していることが分かった。特にウレアウレタン系の低下傾向は著しく、第 4 章の見かけのはく離抵抗性で見られた屋外暴露による経年劣化と同様の傾向を示した。ただし、付着強度ではこの傾向は定かではなかった。

② 耐久性サイクル試験後

- ・ どの工法も耐久性サイクル試験を行うことで、経時的にひび割れ追従性が単純に低下する傾向を示した。
- ・ どの工法も初期値を下回る傾向を示し、屋外暴露試験同様、塗装系の劣化状況を再現していた。

以上より、促進耐候性試験後同様、特にウレアウレタン系の低下傾向は著しく、第 4 章の見かけのはく離抵抗性で見られた屋外暴露による経年劣化と同様の傾向を示した。屋外暴露によるひび割れ追従性の経時変化は、そのほとんどが劣化による低下であり、促進耐候性試験よりも耐久性サイクル試験の経時変化の傾向の方がより一致していた。

- (4) 劣化傾向を室内試験で把握するために採用した「促進耐候性試験」および「耐久性サイクル試験」の 2 種類の促進劣化試験と、屋外暴露耐候性試験での経時変化について検討したところ、

① 促進耐候性試験では一部劣化傾向が推定できない工法もあるが、キセノン照射時間に対する相当暴露年数の推定が可能であった。

② 耐久性サイクル試験では、全工法で相当する暴露年数の推定が可能であった。

- (5) 各促進劣化試験後のひび割れ追従性試験結果と屋外暴露耐候性試験の関係を低下率で検

討したところ、キセノン照射による促進耐候性試験の方が、湿潤環境や温度変化を加味した耐久性サイクル試験よりも良好な相関関係が得られた。

以上、第6章では、劣化要因物質を遮断するため、躯体のひび割れに追従できる性能を評価するひび割れ追従性試験について、その劣化傾向をいち早く把握するために設定した促進劣化試験の有効性について検討した。

- ① 促進劣化試験は屋外暴露耐候性試験と同様の劣化傾向を示した。
- ② 短期間に表面被覆材の耐久性を把握するのに有効な手法の一つである。
- ③ 促進耐候性試験では一部の工法で暴露年数の推定が困難であったが、耐久性サイクル試験では全工法で暴露年数の推定が可能であった。
- ④ 屋外暴露耐候性試験と促進劣化試験との相関関係を低下率で検討したところ、促進耐候性試験の方が耐久性サイクル試験に比べ、より良好な相関関係が得られた。

今回、屋外暴露試験との相関が比較的良好であった促進耐候性試験で工法間を比較すると、クロロプレンゴム系、ウレアウレタン系が比較的良好であった。既存の研究⁹⁾にもあるように、膜厚効果による性能差が表れている。樹脂系内でのばらつきはあるものの、他の樹脂系も基準値を満足しており、問題があるわけではない。ただ、低下率が大きかった工法については注意が必要である。

[第6章 参考文献]

- 1) 樺山好幸, 吉田幸信, 吉田敦, 山田卓司, 宮川豊章: 塗装系防食材の追跡調査に基づく耐久性能評価と付着性能評価手法の提案, コンクリート工学論文集, Vol.14, No.3, pp.11-22, 2003.3
- 2) 安藤幹也, 藤原俊明, 山本雅貴, 山田卓司: コンクリート構造物の塗装系防食材の追跡調査報告, 材料学会, 第5回コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム論文報告集第5巻, pp.399-404, 2005.10
- 3) 日本道路公団 維持管理要領(橋梁編), 第3編コンクリート構造物[Ⅱ]高欄・地覆, 塗装材料規格, 1988. 5
- 4) 山田勝彦: マスコンクリートの塗装に関する調査, 本四技報, Vol.15 No.58, pp9-10, 1991.4
- 5) 国枝 稔, 長瀧 宏弥, 上田 尚史, 中村 光: 表面被覆材のひび割れ追従性疲労試験に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.613-618, 2008
- 6) 飯塚 康弘, 西村 次男, 魚本 健人: ひび割れを有するコンクリートに塗布した表面保護材料の100万回及び1000万回疲労実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.427-432, 2001
- 7) 成瀬 雅也, 田中 宏昌, 関 雅樹, 丹間 靖朗: コンクリート表面保護材の長期ひび割れ追従性試験について, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.433-438, 2001
- 8) 江成孝文, 桐村勝也, 町田洋人, 遠藤三郎: 研究開発テーマ報告 No.R54814-2, コンクリート用補修材料の耐久性評価ー品質規格試験および耐疲労性評価試験方法の開発ー, 財団法人 鉄道総合研究所, 1993, 3
- 9) 宮川豊章, 合川聖二郎, 井上 晋, 藤井 學: コンクリート構造物用樹脂ライニングのひび割れ追従性, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.137~146, 1992.2

第7章 結論

7.1 本研究で得られた結論

塩害や中性化等でコンクリート構造物の劣化が進行していくなか、コンクリート構造物の耐久性向上を図るには、コンクリート構造物の補修・補強が重要である。その手法の一つとして表面被覆工法があるが、構造物の劣化状況を正しく把握し、計画を立てなければ末永く良好な状態に保てる補修・補強は不可能である。また、対象構造物に適用される工法が良好な場合でも、おかれる環境により当初の補修効果がシナリオ通りにいかない場合もあり得る。適用される工法について、表面被覆材自身の性能を正しく評価できなければ折角立てた補修・補強計画も十分な力を発揮できず、想定と大きく異なる結果を迎える可能性もある。

本論文では、表面保護工に適用される表面被覆工法の耐久性能を含めた性能評価を行うにあたり、より有意義な情報を得るため、表面被覆材として重要な、「透過制御」を維持するために必要な性能の一つである付着性とひび割れ追従性に的を絞り、複数の角度から評価できる手法およびその有効性について検討を行った。

以下に、各章により得られた結論を総括する。

第2章「既往の研究」では、コンクリートに対する塗装の取り組みと性能評価基準の変遷、また、実構造物に施工された表面被覆工法の長期に亘る追跡調査の事例をまとめた。また、表面被覆材の性能を把握するために検討された試験方法に関する研究および実構造物に適用された表面被覆工法の追跡調査報告を整理し、コンクリート構造物に用いられる表面被覆工法の耐久性を評価するうえでの試験方法の問題点を提起した。

第3章「表面被覆工法の性能把握に関する試験方法の検討」では、コンクリート構造物の補修・補強の手法の一つである表面被覆工法について、使用される表面被覆材に関する評価項目のとりまとめを行った。また、表面被覆材の耐久性を評価する際、重要な項目である付着性について、**第2章**で提起した問題を解決すべく過去の事例を基に、既存の評価手法で評価しきれなかった現象を把握し、新規な試験方法の提案を行った。

第4章「屋外暴露環境下での表面被覆工法の耐久性評価に関する研究」では、現在、表面被覆工法として使用されている主な表面被覆材を対象に、**第3章**で提案した試験方法を用いて付着性に着目した耐久性評価の検討を行った。

付着性に関して得られた成果を以下に示す。

- (1) 鉛直方向の力に重点を置いた単軸引張による付着強度試験は、その殆どの工法が基板破壊であり、既存の調査結果^{1), 2), 3)}と同様に工法間での性能差を比較することは困難であった。
- (2) 付着強度試験で基板破壊のため性能差が明確でない工法のうち、簡易的に塗膜のはく離現象をイメージしたカッターナイフのはく離試験により、そのはがれ易さを3段階で評価したところ、付着強度試験で基板破壊した工法の性能差を定性的に評価することができた。
- (3) はく離現象を定量的に把握するために採用した見かけのはく離抵抗性試験では、暴露 3

年後において 15 工法中 14 工法ではく離現象を確認することができた。塗膜の材質によっては評価できないものもあるが、単軸引張による付着強度試験で基板破壊を起こしたものが、見かけのはく離抵抗性試験では異なる破壊形態を示したことから、工法間での違いが明確になった。また、経時的に破壊箇所が同じで見かけのはく離抵抗性が低下傾向を示すものについても、耐久性の評価が可能となった。なお、塗膜が脆く適用し難い材料に対しては、適切に評価できる試験条件の確立が必要であり、今後の課題である。

- (4) 付着強度と見かけのはく離抵抗性の相関関係を検討したところ、試験方法間での相間傾向は低く、既往の研究結果^{1), 2), 3)}と同様の傾向がみられることが判明した。お互い異なる付着性を評価していることがわかる。
- (5) 付着性を評価する際、従来の単軸引張による付着強度試験だけでなく、塗膜のはく離現象を考慮したカッターナイフはく離試験や見かけのはく離抵抗性試験を併用することで、これまで付着強度試験で基板破壊のため比較困難であったものが、その違いを評価・考察する一助になるものと考ええる。

第 5 章「屋外暴露耐候性試験と促進劣化試験の相関に関する研究」では、表面被覆材の耐久性を検討するため、2 種類の促進劣化試験を実施し、表面被覆材として重要な性能の一つである付着性に的を絞り、耐久性評価を実施した。また、促進劣化試験で得られた付着性が、屋外暴露耐候性試験の劣化状況と比較し、どの程度の劣化状況であるかを検討した。得られた成果を以下に示す。

2 種類の促進劣化試験（促進耐候性試験および耐久性サイクル試験）後の付着性評価および屋外暴露耐候性試験との関係を検討した結果を以下にまとめる。

- (1) 促進耐候性試験および耐久性サイクル試験について、基板破壊を起こすものや基板破壊以外で同一破壊箇所の場合でも、付着強度が低下傾向にないものがあり、付着強度の劣化傾向は把握し難いことが確認された。一方、見かけのはく離抵抗性試験では、はく離箇所の変化を考慮した場合、劣化傾向を確認することが可能であることが示唆された。
- (2) 耐久性サイクル試験は、工法によっては促進耐候性試験で発生しなかったような塗膜欠陥（主に膨れ現象）を起こすものや、見かけのはく離抵抗性試験で性能値が極端に低下する工法が確認された。促進劣化試験は、材料を短期間に評価するために余りにも過度な促進試験を行うことは、実状と合致しない場合もあるため注意を要する。材料の種類によって繰り返し数を変更することが必要である。ただし、高温多湿環境下での実橋脚では、膨れやはく離等の欠陥も確認されており⁴⁾、今回採用した耐久性サイクル試験は、塗膜欠陥の再現が図られている。
- (3) 促進劣化試験と屋外暴露耐候性試験結果との関係を検討したところ、付着強度試験において、基板破壊を示す工法間の性能比較および暴露との関係は推定できなかったが、破壊箇所に変化のあった工法では、一部暴露年数の推定が可能となった。

一方、見かけのはく離抵抗性試験では、付着強度試験で性能比較が困難であった基板破壊を示した工法間での比較および暴露年数の推定も可能となった。

今後の暴露試験結果と比較することで、促進劣化試験の検討を重ねるとともに、表面被覆材の耐久性に関する評価手法の確立につなげていく必要がある。

第6章「表面被覆工法のひび割れ追従性に関する研究」では、構造物の補修・補強に関して、下地コンクリートのひび割れに追従できる性能を把握するため、表面被覆材のひび割れ追従性に関する検討を行った。更に、促進劣化試験で得られた結果と屋外暴露耐候性試験結果との関係について、ひび割れ追従性試験の有効性を含めて検討した。

得られた成果を以下に示す。

(1) 5年間の屋外暴露耐候性後のひび割れ追従性を経時的にみると、それぞれ使用する樹脂系や種類によって性能値は異なるものの、経時的に低下傾向を示している工法が10工法中8工法となった。中には一時上昇したが5年後では再度低下傾向にあるものもあり、総合的には経時的に低下傾向を示した。屋外暴露による紫外線や水分等の影響を受け、経時的に躯体のひび割れに対する抵抗性が低下していることがわかる。この経時的な性能値の低下傾向は、第4章で述べた付着性ではあまり顕著ではなかったが、ひび割れ追従性では屋外暴露による表面被覆材の劣化傾向が顕著に現れた。

(2) 屋外暴露耐候性試験での性能値を室内で再現する手法として、促進耐候性試験および耐久性サイクル試験を促進劣化試験として実施した結果、以下の事柄が明らかになった。

促進耐候性試験後のひび割れ追従性では、一部の工法を除きキセノン照射することで、初期値を下回る傾向を示し、屋外暴露耐候性試験同様、塗装系の劣化状況を再現していた。特にウレアウレタン系の低下傾向は著しく、第4章の見かけのはく離抵抗性で見られた屋外暴露による経年劣化と同様の傾向を示した。

耐久性サイクル試験後のひび割れ追従性では、どの工法も初期値を下回る傾向を示し、屋外暴露試験同様、塗装系の劣化状況を再現していた。促進耐候性試験同様、特にウレアウレタン系の低下傾向は著しく、第4章の見かけのはく離抵抗性で見られた屋外暴露による経年劣化と同様の傾向が伺われる。

(3) 促進劣化試験としての促進耐候性試験（キセノン照射 1000～3000 時間）では、10 工法中 1 工法が初期値を上回り、キセノン照射時間が増すごとにひび割れ追従性も増加する傾向が認められた。初期から経時的にひび割れ追従性が単純に低下しているのは 10 工法中 3 工法、途中増加するがキセノン照射 3000 時間では低下する工法が 4 工法、残りの 2 工法は低下と増加を繰り返す場合である。促進耐候性試験では、10 工法中 7 工法が経時による低下傾向を示している。

一方、耐久性サイクル試験ではどの工法も、耐久性サイクル試験を行うことで経時的にひび割れ追従性が単純に低下傾向を示している。耐久性サイクル試験 10 サイクル終了時にひび割れ追従性が若干上昇した工法もあるが、サイクル間の性能値差はわずかであり、経時における劣化傾向に対して影響は少ない。

また、屋外暴露耐候性試験によるひび割れ追従性の経時変化は、そのほとんどが劣化による低下傾向を示しており、上述の促進耐候性試験の経時変化の傾向よりも耐久性サイクル試験の経時変化の傾向の方がより一致している。しかし、促進劣化試験後の低下率での相関係数は、促進耐候性試験の方が良好であった。

(4) ひび割れ追従性について、屋外暴露耐候性および劣化傾向を室内試験で把握するために採用した「促進耐候性試験」および「耐久性サイクル試験」と、屋外暴露耐候性試験での経時変化について検討したところ、促進耐候性試験では一部劣化傾向が推定できない工法

もあるが、キセノン照射時間に対する相当暴露年数の推定が可能であった。また、耐久性サイクル試験では、全工法で相当する暴露年数の推定が可能であった。

以上、第6章では、外部からの劣化要因物質を遮断するため、躯体のひび割れに追従できる性能を評価するひび割れ追従性能について、その劣化傾向をいち早く把握するために設定した促進劣化試験は、二方法とも暴露年数の推定が可能であった。特に耐久性サイクル試験ではよく一致していた。

7.2 表面被覆工法に関するシナリオデザイン

第6章まで、コンクリート構造物に対する表面被覆工法に用いられる表面被覆材の性能評価手法および耐久性性能について実験を通じて検証してきた。

今後、コンクリート構造物の予防保全や補修・補強が盛んに行われる時代が続いていくが、その耐久性性能を維持することおよびより施工しやすい材料の開発等により、新しい被覆材料が開発されていくであろう。そのためにも、表面被覆材の耐久性について適切な評価が行われることが望まれる。以下に表面被覆材に関する耐久性評価のあり方を示すとともに、新しい製品の耐久性性能を早くかつ精度よく評価するため、劣化状況を加速させる促進試験の有効性についての提言を行う。

7.2.1 表面被覆工法に関する耐久性評価のあり方

本論文で取り扱った付着強度、見かけのはく離抵抗性およびひび割れ追従性について、耐久性評価を行ったところ、促進劣化試験では見かけのはく離抵抗性試験およびひび割れ追従性試験の双方で、耐久性サイクル試験の方が暴露年数の推定をより掴める結果となった。単軸引張による付着強度試験、見かけのはく離抵抗性試験およびひび割れ追従性試験の促進劣化試験結果を図7.2.1.1～図7.2.1.6に示す。

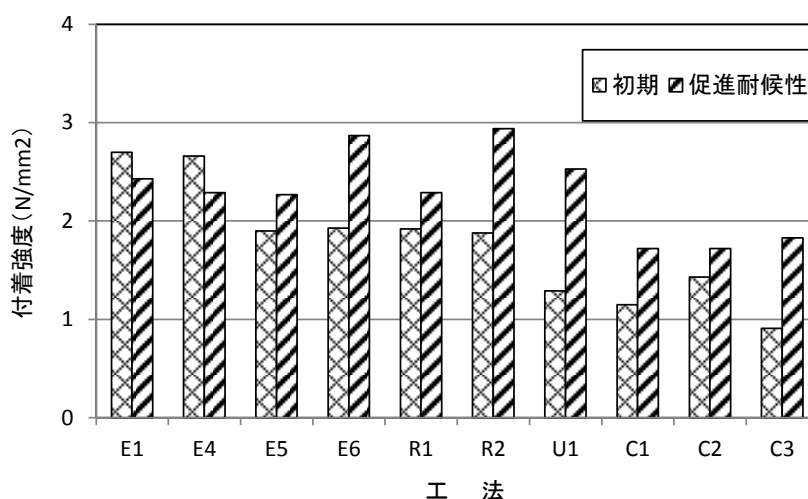


図 7.2.1.1 付着強度（促進耐候性試験）

図7.2.1.1～図7.2.1.3に示す促進耐候性試験では、付着強度試験および見かけのはく離抵抗性試験は初期値を上回る工法があり、各性能値だけでは劣化傾向を示していることが分かり難い。

一方、ひび割れ追従性試験では、一部経時的に増加している工法や、部分的に増加と低下を示す工法があるものの、初期～キセノン照射 3000 時間で低下傾向を示している工法が大半を占めている。ただ、部分的に増加および低下を示すものがある以上、キセノン照射による促進耐候性試験では、表面被覆材の劣化を正確に再現できていないことも示唆されている。

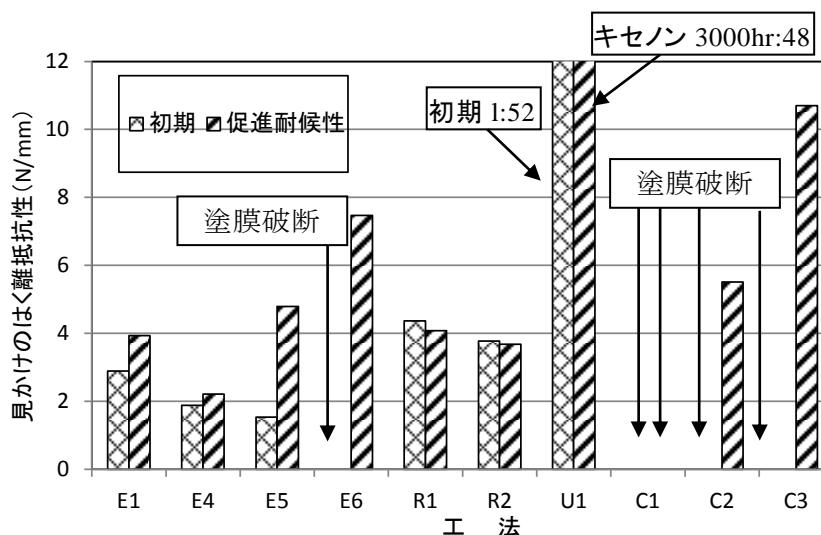


図 7.2.1.2 見かけのはく離抵抗性（促進耐候性試験）

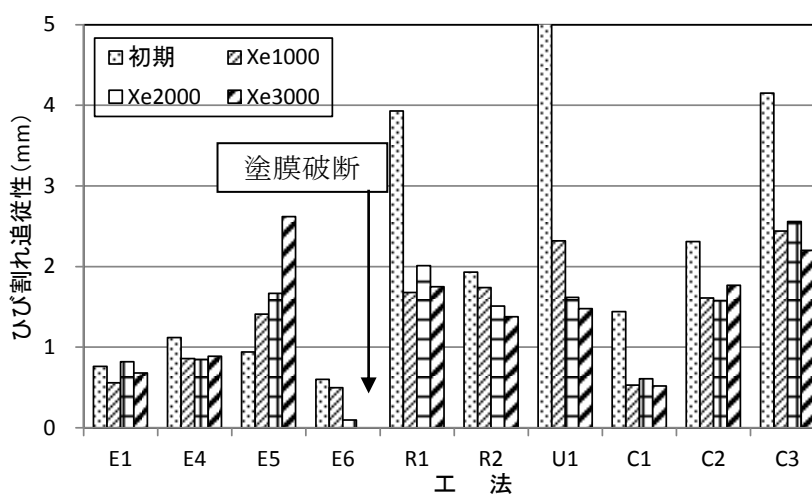


図 7.2.1.3 ひび割れ追従性（促進耐候性試験）

図 7.2.1.4～図 7.2.1.6 に示す耐久性サイクル試験では、促進耐候性試験と同様、付着強度試験および見かけのはく離抵抗性試験は初期値を上回る工法があり、各性能値だけでは劣化傾向を示していることが分かり難い。ただし、第 4 章および第 5 章でも記したように、付着強度試験の多くは破壊状態が基板破壊を起こしているため、工法間の比較は困難であるが、見かけのはく離抵抗性試験では、それぞれのはく離箇所の変化を追うことで工法間の性能差を比較することが可能である。

一方、ひび割れ追従性試験では、ほとんどの工法で耐久性サイクル試験のサイクル数増加に伴い、性能は低下傾向を示している。また、今回採用した促進劣化試験のうち、特に耐久

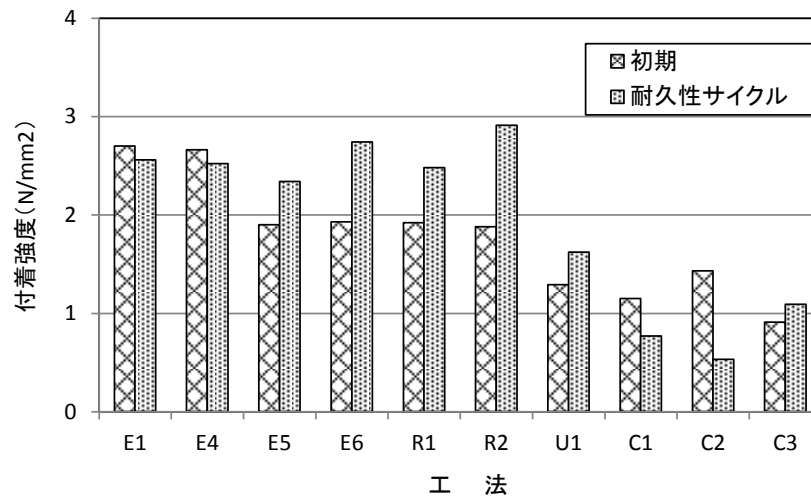


図 7.2.1.4 付着強度（耐久性サイクル試験）

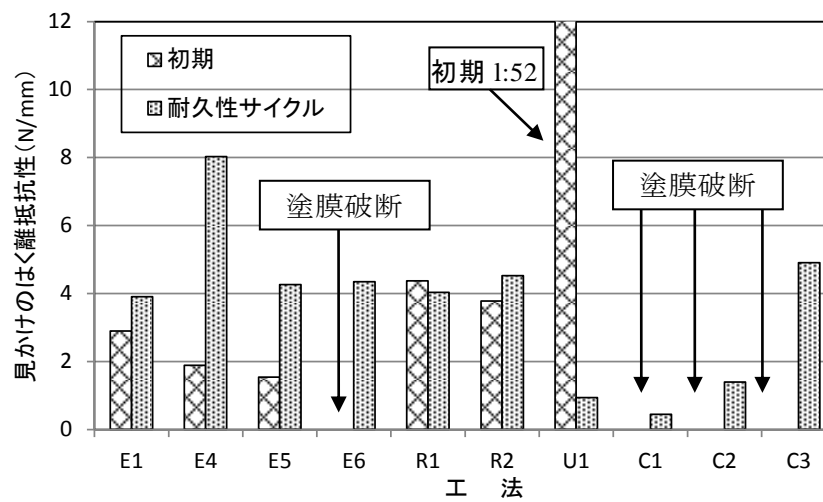


図 7.2.1.5 見かけのはく離抵抗性（耐久性サイクル試験）

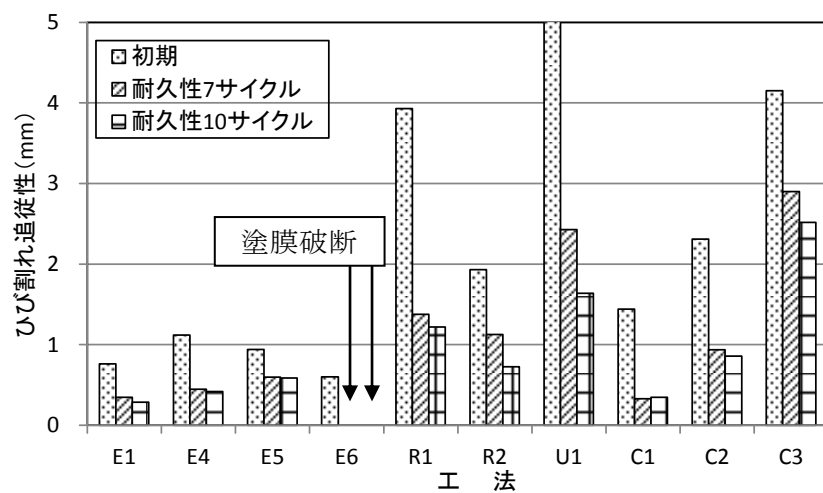


図 7.2.1.6 ひび割れ追従性（耐久性サイクル試験）

性サイクル試験での性能値は長期耐久性を把握するのに良好な手法と考える。なお、促進劣化試験の低下率で屋外暴露耐候性試験との相関関係を検討したところ、耐久性サイクル試験より促進耐候性試験の方が良好な相関関係が得られている。

鉛直方向の力に着目した単軸引張による付着強度試験では、その大半の工法で破壊状態が基板破壊で性能比較が困難であった。しかし、塗膜をはがすイメージを考慮したカッターナイフはく離試験では、各工法のウィークポイントと思われる箇所ではく離現象が確認できた。ただ、その手法自体が簡便なため、定性的な評価しかできなかった。また、この定性的な試験方法の定量化を目的に実施した見かけのはく離抵抗性試験では、性能値だけでは経時変化を追えない工法もあるが、そのはく離箇所の変化を追うことで経時変化をカバーできる可能性のある試験方法であることが判明した。

表面被覆材の付着性評価は、基本的には単軸引張による付着強度試験で問題ないが、同一破壊箇所を示す場合、はく離現象をイメージしたカッターナイフはく離試験や見かけのはく離抵抗性試験を併用することで、より精度の良い付着性に関する耐久性を評価できると考える。ただ、硬くて脆い塗膜には適さない事例もあり、今後の検討課題でもある。

表面被覆材の耐久性評価手法として、キセノン照射による塗膜表層部分の劣化が主な促進耐候性試験や、紫外線劣化に加えて湿潤環境や低温・高温の繰り返しによる温度差環境によるダメージを加味した耐久性サイクル試験を、促進劣化試験方法として採用した。

促進劣化後の二次物性評価として、① 付着強度試験、② 見かけのはく離抵抗性試験、③ ひび割れ追従性試験 の3種類の物性評価を行った結果を以下に示す。

① 付着強度試験：

促進劣化後も基板破壊する工法が多く、直接性能を比較することは困難である。

② 見かけのはく離抵抗性試験：

一部試験が実施できない工法もあるが、その塗装系でのウィークポイントの発生による破壊箇所の変化により、付着強度試験に比べて工法間の性能比較および劣化傾向を把握することが可能である。なお、促進劣化試験のうち、暴露年数を推定できる工法が多かったのは耐久性サイクル試験である。

③ ひび割れ追従性試験：

見かけのはく離抵抗性試験と同様に、耐久性サイクル試験を利用することで長期に亘る耐久性の推定が可能であることが示唆された。しかし、促進劣化試験後の低下率で屋外暴露耐候性試験との相関関係を検討した場合、促進耐候性試験の方がより良好な相関傾向を示している。

以上より、表面被覆材の透過制御を左右する付着性およびひび割れ追従性について、付着性では、従来からの鉛直方向への単軸引張による付着強度試験に加え、はく離現象を考慮した見かけのはく離抵抗性試験を併用することで、塗装系の脆弱部の確認ができることが解明できた。ひび割れ追従性では、付着性より劣化傾向を掴みやすいことが確認できた。また、表面被覆材の劣化状況を把握する促進劣化試験については、従来から採用されている促進耐候性試験より、湿潤および温冷条件を考慮した耐久性サイクル試験が、屋外暴露耐候性試験と良好な関係を示し、耐久性評価を行うのに有効な手段の一つであることが確認できた。すなわち、耐久性評価は初期性能だけでなく、負荷を与えた上での評価が重要である。なお、

今回採用した促進劣化試験のうち耐久性サイクル試験は、現場の実構造物で発生している塗膜欠陥を再現することを目的としているため過酷な条件の劣化環境を作りだしている。採用にあたっては各工法の特性を加味したうえで、適切なサイクル数を設定する必要がある。

7.2.2 シナリオデザイン

コンクリート構造物は適切に設計、施工、維持管理をすれば非常に長持ちするが、それでも劣化する。また、設計、施工、維持管理が適切とはいえない構造物が現存するのも事実で、このような場合には、劣化の進行が著しい速度で進行することもある。そのため、劣化した、或いは劣化が進行しているコンクリート構造物の延命策として種々の工法が提案され実用化されており、表面被覆工法もそのひとつと位置付けられている。劣化因子の侵入を抑制することを目的とする表面被覆工法は、劣化が極端に進んだ（加速期・劣化期）構造物ではなく、なるべく劣化初期（潜伏期・進展期）に適用するのが効果的であり、その意味では予防保全として、新設時に適用して劣化速度の抑制を図るのにも有効であるといえる。今後、コンクリート躯体との一体性があり、躯体コンクリートのひび割れにも十分追従でき、環境物質を遮断できる耐候性の良好な表面被覆材を、新設時及び供用後なるべく早い段階での積極的な適用検討がなされることが期待される。表面被覆工法を適用するコンクリート構造物の今後望まれる補修に関する基本的な流れを以下に示す。

[長寿命化に向けた手順]

既存構造物の延命に対する対策として補修を選定し、表面被覆工法の適用を決定した場合、期待される効果の持続期間中に、劣化に対して所要の性能を有しなければならない。また、表面被覆工法を適用する時期は、少なくとも潜伏期、進展期の間に実施するのが望ましい。加速期での補修は、工法適用による性能アップの期間が短く、期待するほどの延命期間が望めないためである。なお、劣化期に突入した時点での補修は、ほとんど延命が望めないので注意が必要である。コンクリート構造物の耐久性の回復・向上を目的とした補修計画は、

① 対象構造物の現況調査（構造物および環境の詳細調査）

劣化状況：ひび割れ状況、鉄筋腐食状況、塩化物イオン含有量、中性化深さ 等

環境条件：塩害地域、凍害地域、高温多湿地域、山間部、都市部 等

対象物の構造劣化：水まわり環境（漏水個所の有無や排水処理の形式）

② 目的とする対策工の検討（対策工の選定：耐久性向上、劣化阻止、美観向上 等）

③ 対象劣化対策の絞り込み（要求性能の設定：中性化、塩害、アルカリ骨材反応、凍害 等）

④ 採用対策工法の仕様選定（施工計画立案：仕様の調査および決定）

[例]塩害対策：塩化物イオン、酸素、水、炭酸ガス等、コンクリート中の鉄筋への腐食物質の透過浸透を抑制する一般的なコンクリート保護適性を有し、コンクリートの強アルカリによって劣化せず、コンクリートとの付着の良好なものであることと同時に、耐候性およびヘアクラックに追従するひび割れ追従性が要求される仕様。

と進め、施工完了後には、当初の計画に沿った補修内容を確認する。さらに、初期点検により適用後の不具合の有無を把握し、今後の点検に対する基礎資料とする。

なお、④での施工計画の立案に際しては、発注者、施工業者および材料開発業者が参加で

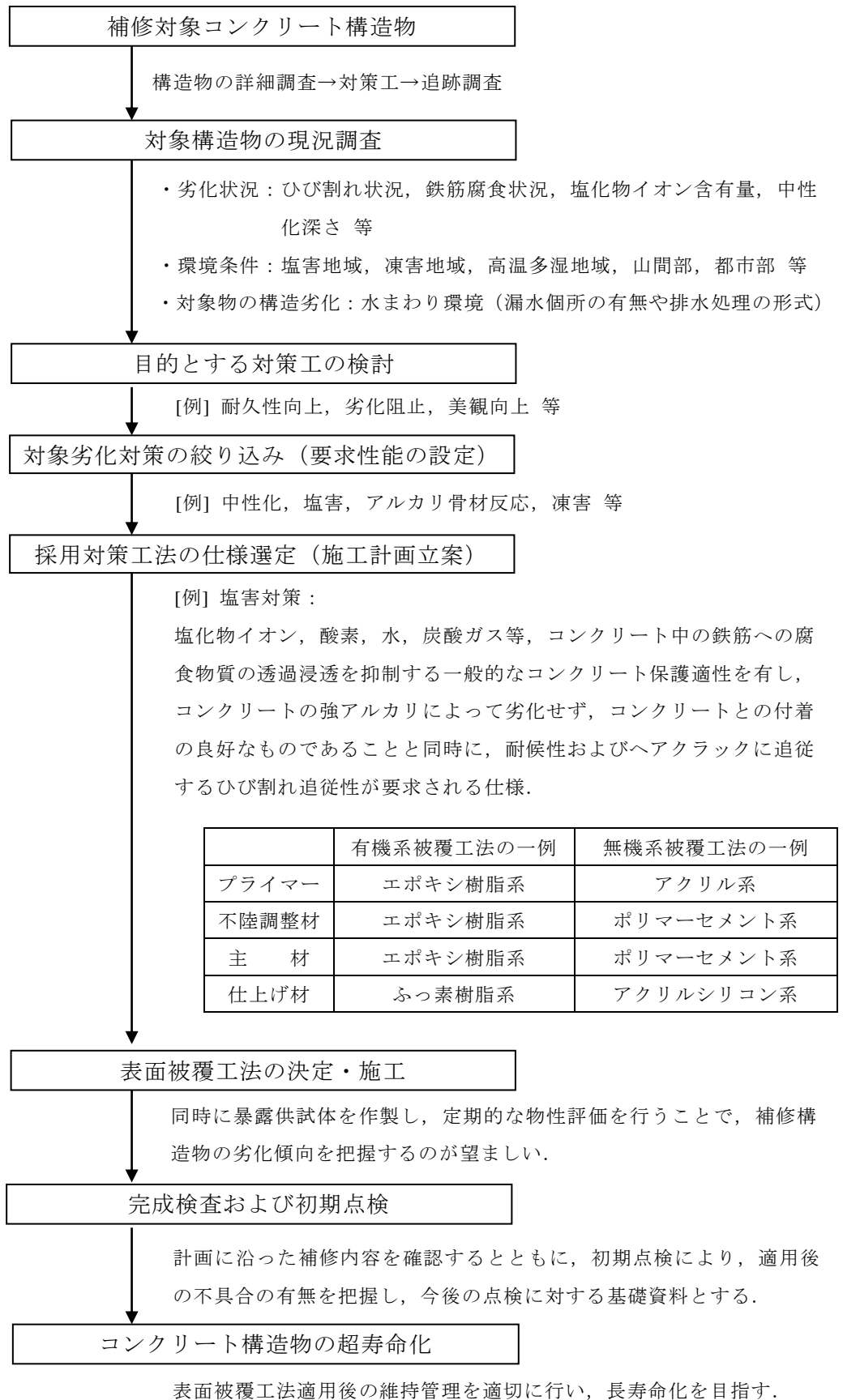


図 7.2.2.1 コンクリート構造物への表面被覆工法適用に関する手順

きる検討委員会等を設置し、各分野からの意見を聴取するのが望ましい。特に使用する材料は多岐にわたる。一概に「エポキシ樹脂系」としても、使用する主要樹脂のタイプや架橋密度により性能が変わるため、専門家の知見が必要である。例えば、架橋密度を過剰に上げると硬質で強靱な樹脂となり、環境物質を遮断する性能は向上するが、柔軟性が落ちるためにひび割れ追従性が低下する恐れがある。一方、架橋密度を下げると柔軟性は増すが、網目構造が粗くなるために環境物質の遮断性能が低下する恐れがある。また、対象構造物への施工と同時に暴露供試体を作製し、構造物の近隣にて屋外暴露耐候性試験を行い、定期的に物性評価を行うことで、補修後の構造物の劣化傾向を把握するのが望ましい。図 7.2.2.1 にコンクリート構造物への表面被覆工法を適用する場合の手順を示す。

さらに、②の対策工を検討する際の注意点として、対策工の目的を設定するには、耐久性の向上、劣化阻止、美観向上等があるが、これとは別に表面被覆工法の在り方も考慮する必要がある。通常、コンクリート構造物を守るため、躯体のひび割れに追従できる塗膜や躯体と付着の良い塗膜が要求される。しかし、躯体が塗膜で覆われているため、躯体自身のひび割れ程度や塗膜下の劣化状況は把握し難い。そこで、躯体の劣化をいち早く把握するため、躯体のひび割れに追従しない塗膜や躯体と塗膜界面に異常があった場合に容易にはがれる塗膜を要求する場合が想定される。このような塗膜の場合、発見後すぐに手当てができる状況であれば問題ないが、放置期間が長期にわたると欠陥部から環境物質が浸透し、躯体の劣化を早めることになるので注意が必要である。また、構造物に塗膜のひび割れやはがれがあると景観上も好ましくない。したがって、このような例では、要求される塗膜の性質が正反対になるため、補修計画を行う際には対象構造物の守り方も考慮する必要がある。ただ、このような例は、対象構造物の現況調査の段階で躯体の状態が想定外に悪く、躯体自体の劣化が早期に起こる可能性がある場合に選択されると予想する。しかし、躯体がそこまで劣化していれば、断面修復を行った後、表面被覆材を塗布する等の手段を選択し、遮断性能が高くひび割れ追従性の良好な材料を用いるのが望ましい。また、表面被覆工法を推奨する側としては、ひび割れに追従しない塗膜は推奨し難い。

[適用後の維持管理]

表面被覆工法適用後は、コンクリート構造物に要求される所要の性能の水準が維持されるように、残存する予定期間を通じて適切に行われなければならない。すなわち、適用した表面被覆工法に対して、適した方法や頻度で点検を実施することが重要である。上述のように、表面被覆工法適用直後に行う初期点検によって得られた基礎資料を基に、適用後の不具合の有無を把握し、今後のコンクリート構造物の長寿命化に向けての維持管理を行う。以下に維持管理手順の一例を示す。

- ① 日常点検では、目視による外観評価（膨れ、割れ、はがれ等）および触診による表面被覆材の異常（塗膜の浮き）の有無を確認。
- ② 定期点検では、日常点検での項目に加えて付着性やひび割れ追従性の点検を行う。

実構造物で行う付着性能評価は、建研式に代表される単軸引張による付着強度試験を行うのが一般的で、ほとんどの場合、基板破壊を起こすために劣化の進行度合いが把握し難い状況である。そこで、単軸引張による付着強度試験だけでなく、はく離現象を考慮したカッターナイフはく離試験を併用することで、定性的な簡便法ではあるが塗膜のは

がれる箇所からその塗装系の脆弱部の把握を行う。定期点検の実施頻度は2～5年に1回を目安とするが、例えば、1回目の定期点検で0.1mm幅のひび割れが観察された場合、少なくとも定期点検を2年後に行い、ひび割れ幅の拡大の有無を確認するのが望ましい。また、定期点検時に重大な欠陥が確認された場合は、詳細点検を実施することが重要である。

- ③ 別途、補修構造物の近隣箇所に暴露しておいた暴露供試体を定期的に回収し、その物性評価を行うことで補修構造物の劣化傾向を把握する。調査項目としては、少なくとも塗膜の外観（膨れ、割れ、はがれ等）、付着性およびひび割れ追従性とし、劣化対策別に遮断性（塩化物イオン、二酸化炭素、水）等の評価を行うのが望ましい。

また、付着性を評価する場合、7.2.1項でも記したように、単軸引張による付着強度試験だけでなく、はがれ現象を考慮した見かけのはく離抵抗性を併せて行い、対象塗装系での脆弱部の有無を把握することで、補修構造物の耐久性把握の一助とする。

適用した表面被覆工法が長期に亘って異常なく、維持されることが望ましいが、予想に反して早期に劣化傾向が確認された場合は、早い段階での手直しまたは再補修計画を立てる必要がある。

また、表面被覆工法を適用したコンクリート構造物の長寿命化には、「調査→補修計画→施工」という維持管理のための一般的な流れとは別に、

- ① より信頼性の高い表面被覆材の開発

- ② 表面被覆材に関するより信頼性の高い評価および試験方法の開発

等があり、継続的に行われることが極めて重要である。①については使用される環境や躯体の劣化進行度合いによって、主要樹脂の選定およびブレンドが必要となるため、材料メーカーに要請するのが望ましい。②については、関係する学協会、団体、試験機関等が協力することで、施工されている表面被覆材をより適切に評価する試験方法の開発・検討が必須であり、今後も継続して取り込んでいくことが必要である。

以上、表面被覆材を評価する際、その目的によって試験項目を選択し、与えられた試験方法で評価することおよび得られたデータを忠実に扱うことは当然であるが、その得られたデータが、実際の現象と異なる場合、性能評価者が一方向の考え方だけで良し悪しを判断するのではなく、与えられた試験方法の特性を熟知したうえで判断することが重要である。

大事な社会資本であるコンクリート構造物を、補修・補強あるいはアップグレードという目的を達成させるため、設計・施工・維持管理・補修および補強に対して最適と思われるシナリオを組み立て、丈夫・美しく・長持ちできるように努めることが望まれる。表面被覆材の耐久性を評価する場合も同様に、良いものは良く、悪いものは悪いように評価できる更なる良好な評価手法が構築されることに期待する。

7.3 今後の課題

本論文の主題である「表面被覆工法の耐久性評価手法」に関しては、これまでの多くの研究成果を踏まえて、表面被覆材の耐久性を評価するために必要な性能項目とその評価手法が指針化・基準化されている。しかし、これらはいずれも代用特性や代用試験によるものであるため、暴露試験の結果との相関が必ずしも高くないものもある。本研究では、①評価手法

および②促進劣化試験方法の２点について、①でははくり現象に着目した見かけのはく離抵抗性試験を、②では耐久性サイクル試験を新たに提案し、その有効性を確認した。しかし、見かけのはく離抵抗性試験では、硬い塗膜に対しての評価が困難であること、また、耐久性サイクル試験については、用いられる工法によって最適なサイクル数の設定が必要であること等、検討すべき事項がある。今後は、残る課題を克服すると同時に、その他の評価手法についても精度が高く屋外暴露耐候性試験との相関性が良好な評価手法や促進試験の検討・確立が重要である。関係各機関等と協力する中、課題解決に向けてさらなる検討を進めたい。

[第 7 章 参考文献]

- 1) 山田 卓司, 佃 洋一, 山本 貴士, 国枝 稔, 宮川 豊章: 表面被覆工法の付着特性に着目した耐久性評価方法に関する研究, 材料, Vol.61, No.10, pp.715-720, 2012.10
- 2) 樺山好幸, 吉田幸信, 吉田敦, 山田卓司, 宮川豊章: 塗装系防食材の追跡調査に基づく耐久性能評価と付着性能評価手法の提案, コンクリート工学論文集, Vol.14, No.3, pp.11-22, 2003.3
- 3) 渡辺 佳彦, 荒巻 智, 松田 好史, 山田 卓司, 宮川 豊章: 山陽新幹線 RC 高架橋に適用する表面被覆工法の評価方法について, 材料, Vol.58, No.8, pp691-696, 2009.8
- 4) 竈本 武弘, 野島 昭二, 藤田 庫雄: コンクリート表面被覆材の耐久性向上に関する検討, コンクリート工学, Vol.47, No.2, 2009.2

謝 辞

本論文は、私こと山田が財団法人日本塗料検査協会に昭和 60 年 4 月入社以来取り組んできた塗料・塗膜に関する性能評価方法からはじまり、昨今、その重要性がますます話題となっているコンクリート構造物の維持管理に焦点を当て、コンクリート構造物に用いられる表面被覆工法の耐久性評価手法に関する研究を取りまとめたものであります。研究を進めるに際し、平成 25 年 4 月より、京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻構造材料学研究室博士後期課程にて行いました試験・調査研究および本論文を作成するにあたり、多くの皆様から貴重なご指導、ご鞭撻、ご支援を賜りました。本日ここに論文が完成できたことを感謝申し上げます。

京都大学大学院工学研究科教授 宮川 豊章博士には、今から 15 年ほど前に聴講させていただきました講演会が最初でした。その際、社会的に貴重な大型構造物の維持管理のお話の中でシェークスピアのくだりがあり、維持管理に関するシナリオデザインの重要性についてご講演されました。その中で、「丈夫で・美しく・長持ち」、「データベースを大きなゴミ箱にしない」、「造ったあとは使いこなす」等、当時、塗料の試験・検査業務を主軸にしていた筆者には、とても印象に残るフレーズでした。本論文をまとめるにあたり、終始懇切丁寧なるご指導とご教示を賜りました、衷心よりお礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科教授 河野 広隆博士には、本論文作成にあたり貴重なご指導、ご助言を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科准教授 山本 貴士博士、助教 高谷 哲博士、安 琳博士、技官 平野 裕一氏をはじめとする構造材料学研究室の皆様には、討議から論文作成に至るまで多大なるご指導、ご鞭撻を賜りました、厚くお礼申し上げます。また、秘書 三木 由有さんには、筆者が事務関係に不慣れなため、事務手続き等で何かと手助けをいただきました、ここにお礼申し上げます。

研究論文の取りまとめ方および指導をはじめとし、様々なご支援や励ましをいただき、特に論文をまとめる機会を作っていただいた西日本高速道路エンジニアリング関西㈱(元 旧日本道路公団試験研究所 橋梁主幹) 樫山 好幸博士に対しては、その出会いがなければ、本論文をまとめることなく、世に出せなかったものと深く感謝する次第であります。

第 4 章「屋外暴露環境下での表面被覆工法の耐久性評価に関する研究」、第 5 章「屋外暴露耐候性試験と促進劣化試験の相関に関する研究」および第 6 章「表面被覆工法のひび割れ追従性に関する研究」では、岐阜大学 名誉教授 小柳 洽博士、岐阜大学 教授 国枝 稔博士をはじめ、公益社団法人 日本材料学会 コンクリート工事用樹脂部門委員会 補修用樹脂小委員会の委員の皆様には、試験片作製をはじめ、得られた結果に対して貴重なご意見を賜り、ここに厚く御礼申し上げます。

筆者が会社に籍を置き役職を維持しながら、博士課程にて研究を行う機会を与えていただき、多大なるご支援とご指導を賜りました、(一財)日本塗料検査協会 元専務理事 中北 文彦氏、同 専務理事 中家 俊和氏、同 総務部長 西 和代氏、同 西支部長 沼田 収平氏、同 東支部長 小川 進氏、同 技術開発部長 中山 俊介氏、同 顧問 前川 晶三氏、西本 悟氏、また、筆者が職責を全うできるよう日々サポートしていただいた、(一財)日本塗料検査協会 管理

部 部長 加来 伸一氏，同 西支部検査部 部長 奥野 博昭氏，同 東支部検査部長 河村 マリ氏に厚く御礼申し上げます。また，第4章および第5章で採用した見かけのはく離抵抗性試験方法の開発に向け，多大なご指導と叱咤激励を賜りました，（一財）日本塗料検査協会 元技術開発部長 小島 務氏，同 元技術開発部 課長 仙波 亨氏，田浦 正治氏，同 西支部検査部 部長代理 森蘭 正明氏に厚く御礼申し上げます。さらに，研究を進めていく上で膨大な実験をスムーズに進めていただいた（一財）日本塗料検査協会 技術開発部課長 勝井 要氏，同 西支部検査第2課長 佃 洋一氏をはじめ，検査部職員の皆様に厚く御礼申し上げます。

昨年4月から博士後期課程での研究を行うに当たり，（一財）日本塗料検査協会 本部をはじめ，西支部および東支部の皆様には，業務の上で数々の手助けをいただき，入学後1年で本論文を取りまとめることができました。ここに厚く御礼申し上げます。

同時期に社会人ドクターであった，（独）土木研究所 河野 哲也氏，（株）ピーエス三菱 小林 仁氏，（株）IHI インフラ建設 山下 亮氏，国際設計（株）葛目 和宏氏，電気化学工業（株）宮口 克一氏，西日本旅客鉄道（株）吉田 隆浩氏，同期入学の三井住友建設（株）室田 敬氏，同佐々木 亘氏，西日本旅客鉄道（株）村田 一郎氏とは，各自の研究課題について討議し，貴重なご意見をいただくことでお互い切磋琢磨できたことは，何物にも代えがたい経験でありました。特に同期入学の我々4人は，授業に備え，お互い慣れない英語での討議練習をさせていただきました。これからは，コンクリート構造物の維持管理について，その対象となる構造物に最適なシナリオデザインを描けるよう，今後とも研鑽に努める所存であります。

今から約5年前の平成21年5月，筆者が博士後期課程に進む決心を当時85歳であった亡父に告げ，結果を知ることなくその年の9月に他界した父（享年87歳）に感謝の意を添え論文完成の報告ができることをうれしく思います。

最後になりましたが，日々の仕事に追われる筆者を，常に健康面・食事面に気を遣い，心身ともに励ましかつ支えてくれた妻 恵子と，いつも我々の心の支えとして，心身ともに健やかに育ってくれた息子・娘，また，今まで相当な心労をかけているにもかかわらず，常に見守ってくれた母に感謝の気持ちを捧げます。

2014年3月